

Caffeine as an anthropogenic marker of pollution of groundwater. Possible uses in mountain basins

La caffeina come indicatore di contaminazione antropogenica delle acque sotterranee. Possibilità di applicazione nei bacini montani

Gianfranco Bazzoli^{1,2}, Marco Visintainer¹, Silvano Arman¹, Cornelio Gottardi¹

¹ Trentino Servizi S.p.A.

via Fersina, 23 – 38100 Trento, Italy

² Studio Geologico Associato GeoAlp

Via Zara, 14 – 38100 Trento, Italy

ABSTRACT

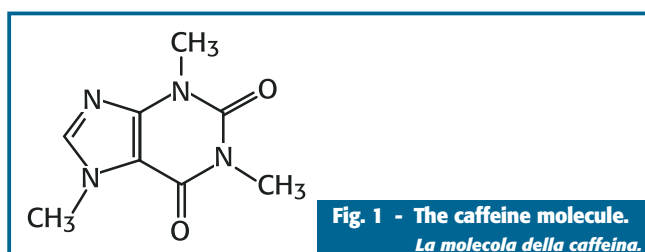
Studies on the use of caffeine as a marker of surface and ground water pollutions from anthropic wastewaters are in progress from some years. Caffeine is indeed an undoubtable and non-ambiguous indicator of contamination from domestic wastewater, as it is consumed only by humans. The main environmental sources for caffeine are urban wastewaters, septic tanks effluents, urban landfill leachates. The use of this molecule as an hydrogeologic marker has pros and cons: the main advantage is that caffeine is site-specific for anthropogenic wastewaters. Moreover, the analytic methodology allows a very low detection limit, in the order of a trillionth of gram per liter (nanogram per liter: ng/l) at a relatively low cost. However, it is now certain that this molecule is ubiquitous in the waters downstream densely populated areas, and that it is non-conservative. That limits, or at least complicates, its utility as a pollution marker in these areas. In the areas having a low-density population, as mountain basins are, the molecule is not ubiquitous, and the caffeine detection could be successfully used to focus the investigations for microbiological pollution of groundwater, and to evaluate the aquifer quality. In this paper the results of a cognitive screening of caffeine contents in surface and ground waters of central Trentino region (Italy) are given.

RIASSUNTO

Da alcuni anni si studia la possibilità di utilizzare la caffeina come tracciante della contaminazione delle acque superficiali e sotterranee da parte di acque reflue di origine urbana e domestica. Infatti la presenza della caffeina è una indicazione chiara e non ambigua della provenienza da acque reflue domestiche, essendo utilizzata e ingerita solo dagli esseri umani. Le principali fonti di immissione della caffeina nell'ambiente sono costituite dalle acque nere urbane, dai reflui delle fosse settiche, dal percolato di discarica di rifiuti solidi urbani. L'utilizzo come marker idrogeologico di questa molecola presenta dei vantaggi e degli svantaggi. Il vantaggio principale è che indica provenienza da reflui di origine antropica. La metodica analitica consente inoltre un limite di rivelabilità molto basso, dell'ordine del trionesimo di grammo per litro d'acqua, (nanogrammo/litro: ng/l), a costi relativamente bassi. Tuttavia è ormai assodato che il composto è ubiquitario nelle acque a valle delle aree ad alta densità di popolazione, e che non è conservativo. Ciò ne limita o quantomeno ne complica l'utilizzo come indicatore di contaminazione in queste aree. Nelle aree a bassa densità abitativa, come i bacini montani, in cui il composto non è ubiquitario, l'analisi della caffeina può venire utilizzata con successo per indirizzare le indagini sulla contaminazione microbiologica delle acque sotterranee e per la valutazione del pregio degli acquiferi. In questo documento si presentano i risultati di uno screening ricognitivo del contenuto di caffeina nelle acque superficiali e sotterranee del Trentino centrale (Italia).

1. INTRODUCTION

Studies on the possible use of caffeine as a marker of surface and ground water pollutions from anthropic wastewaters are in progress in western countries from some years. Caffeine is indeed an undoubtable and non-ambiguous indicator of contamination from domestic wastewater, as it is consumed only by humans.



The analyses for caffeine presence in surface and groundwaters were made mainly in the last decade, the research being essentially focused at three purposes:

1. identify tracers able to univocally demonstrate contamination of surface water or ground water from domestic or public waste water treatment plants, and, in particular, back-trace the pollution of stormwater systems to sewage system failures.
2. demonstrate that the source of nitrate contamination of groundwater was from septic systems and not from other possible sources, as fertilizers. The researches of SEILER *et al.* [1999] and KOLPIN *et al.* [2001] may be quoted. These Authors sampled many streams in the United States. SEILER *et al.* [1999] analyzed also groundwaters, either from private and public supply wells. Recently PEELER [2004] during a thesis work dedicated to caffeine and its correlation with wastewater-related microbiological pollution, performed sampling trips in Florida and Georgia, analyzing spring waters, too.
3. define the concentration of the caffeine molecule in surface and ground waters, where it finally arrives through wastewaters systems, after consumption by humans.

Studies having similar purposes are now carried out worldwide, using an increasing number of chemical anthropogenic markers. In particular, molecules from different pharmaceutical products and their metabolites (PhACs, Pharmaceutically Active Compounds) are considered, as well as molecules from Personal Care Products (PCPs). Sampling and investigations for these molecules were made by BARBER *et al.* [1995], KOLPIN *et al.* [2002], HEBERER [2002], POIGER *et al.* [2003], JOHNSON *et al.* [2004], HINKLE [2005]. FUGANTI *et al.* [1996] applied the analysis of gadolinium (used in clinical magnetic resonance imaging) to assess the age of groundwaters.

The results of the sampling for anthropogenic molecules can be used also in a reverse way, to make an assessment of the human consumption of specific molecules: in 2005 ZUCCATO *et al.* published estimates on cocaine consumption in Po river basin, starting from cocaine concentration in Po river surface water and in wastewater treatment plants of its basin area. Caffeine analysis could also be used for a similar kind of assessments.

2. ENVIRONMENTAL SOURCES OF CAFFEINE

Caffeine in nature is found in over 35 species of plants, including coffee (*Coffea Arabica*), tea, cacao (*Theobroma*, *Camelia* spp.), Yerba Mate (*Ilex paraguariensis*) [REGINATTO *et al.*, 1999], Guaranà (*Paullinea cupana*), cola (*Kola nitida*), all generally living at tropical and subtropical latitudes. Caffeine presence in other plants of *Ilex* family (sp. *vomitaria*) is reported [PEELER, 2004], but for other *Ilex* species found at Europe's latitudes (e.g. *Ilex aquifolium* or *Ilex verticillata*) caffeine contents are not confirmed in literature.



Fig. 2 - The coffee plant. The caffeine content in seed may vary from 600 to 32000 ppm.

La pianta del caffè. Il contenuto di caffeina dei semi può variare tra 600 e 32000 ppm.

Caffeine is a component of many beverages (coffee, tea, cola) and is found in chocolate and in pastry products containing cacao. It is also used as a component in some pharmaceutical products.

A coffee serving may contain, depending on roasting method and preparation, from 40 mg (espresso) to 135 mg (regular coffee) of caffeine; a cup of tea contains 30 to 50 mg, a cola drink from 34 to 46 mg per serving [MAYO CLINIC, 2003].

WHO [1997] estimates the global average caffeine consumption as 70 mg/day per person. In the human organism caffeine is metabolized in the liver and only a low percentage (from 0.5% to 10% of assumed quantity) is excreted via urine [SEILER *et al.*, 1999, SIEGENER & CHEN, 2002]. Due to its almost universal consumption, the caffeine concentration in wastewaters of high-density population areas is relevant and detectable.

The input of caffeine in natural environment follows mainly the domestic wastewater paths: sewage systems, septic tanks, wastewater treatment plants. A fraction of the stimulant beverages (coffee, tea) preparation residues is discarded as municipal solid waste, wet fraction. Thus, possible sources in the environment are the landfill leachates and the products of composting plants (domestic or public). Moreover, in some instances, the coffee solid residuals are used for private gardening, and may infiltrate in the soil. All these sources are anyway traceable to anthropic activity and settlements, and caffeine may without doubt be considered as an anthropogenic marker.

3. ANALYTICAL METHODS

Modern chemical analysis technologies allow the detection of caffeine in concentrations of nanograms per liter (10^{-9} gr/l). The methods are relatively simple, and analytic costs are moderate. Sampling of a good quantity of water is recommended. In the first period of our screening the sample volumes were 5 liters. As lower concentrations can be detected by processing larger volumes of samples, in the last period of the investigation we forced our detection limit using 10 liter samples. The analysis must be performed within a few days, because the molecule is degraded by photolysis and by time. Sampling and analysis must be performed with a great care, to avoid any sample contamination (personnel should wear gloves and face masks, and avoid assumption of coffee or tea).

All experiments were performed on a automated Dionex High Performance Liquid Chromatography system, an automatic sample processor Aspec XL from Gilson, and a Diode Array Detector (DAD). The system was controlled by a workstation. Isolute EMV+ cartridges were used for the sample enrichment and cleanup, and Dionex C18 (250x4 mm) chromatographic column was used for the separation of caffeine.

The conditioning process was performed sequentially with 5 ml methanol and 5 ml deionised water at 2.5 ml/min. Afterwards, the water samples were passed through at 10 ml/min. Finally, the retained

compounds were eluted using 5 ml CH_2Cl_2 , dried with nitrogen, and recovered with 1 ml mobile phase (phosphate buffer pH 2.8 - acetonitrile 85:15). Caffeine in waters was confirmed by using DAD detection technique to compare its purity of spectra with that from caffeine standard, and the identification also is based on its retention time and spiked with known concentration of caffeine.

4. ENVIRONMENTAL FATE OF CAFFEINE AND CONCENTRATIONS DETECTED IN DIFFERENT WATER ENVIRONMENTS

The environmental fate of caffeine is described in literature. Wastewater treatment plants (WWTPs) considerably reduce caffeine concentration in surface waters. The concentration lowering is attributed to microbic degradation. HEBERER [2002] notes a nearly complete elimination (>99%) of caffeine in Berlin WWTPs; POIGER *et al.* [2003], note similar elimination percentages in the most part of sampled WWTPs, and consider that lower WWTP's efficiency in caffeine elimination (80.9 - 97%) is due to lower age of treated sludge. However, in U.S.A. rivers the highest caffeine concentrations are observed in WWTPs effluents or in surface waters just downstream WWTPs. More downstream, caffeine concentrations are lower, and the most efficient lowering process appears to be progressive dilution.

BUERGE *et al.* [2002] and POIGER *et al.* [2003] consider of secondary relevance for the caffeine degradation either biological mediated processes either photolysis, but PEELER [2004] shows that sample exposure to light and temperature variations really lower the concentrations, and quotes former experimental tests concerning caffeine persistence in samples. Conservation of samples in darkness and at low temperatures (4-5 °C) appears to be a recommendable practice; analyses should be performed in 3-4 days from sample collection and lab delivery.

Caffeine appears to be ubiquitary in the areas downstream populated places: it was detected at variable concentrations in rivers, lakes, springs, wells, and even in sea water. POIGER *et al.* [2003] even correlate the caffeine concentration in Switzerland lakes with population living in related catchment areas. In Table 1 literature analytic data on caffeine concentration for WWTPs influents, WWTPs effluents, and river, lakes, sea, spring waters and for groundwaters are given.

Table 1 - Literature data on caffeine in waters.

Sampling location	Reference	Min ng/l	Max ng/l	Average value or from single sample ng/l
Caffeine at wastewater treatment plants influents				
Germany, Berlin	Heberer, 2002	–	640000	230000
USA, Boston	Siegener <i>et al.</i> , 2002	–	–	20000
Switzerland	Berge <i>et al.</i> , 2003; Poiger <i>et al.</i> , 2003	7000	73000	–
Caffeine at wastewater treatment plants effluents				
Germany, Berlin	Heberer, 2002	–	3000	180
USA, Boston	Siegener <i>et al.</i> , 2002	–	–	6700
Switzerland	Berge <i>et al.</i> , 2003; Poiger <i>et al.</i> , 2003	28.9	9480	–
USA	Drewes <i>et al.</i> , 2003	–	–	15700
Canada	Metcalf <i>et al.</i> , 2003	22	677	–
USA Tallahassee	Peeler, 2004	–	–	193.4
USA, Washington	Johnson <i>et al.</i> , 2004	21000	30000	–
USA, Oregon	Hinkle <i>et al.</i> , 2005	<500	320000	49000
Caffeine in river and lake waters				
USA, rivers	Kolpin <i>et al.</i> , 2002	<d.l.	6000000	81
Switzerland rivers	Berge <i>et al.</i> , 2003; Poiger <i>et al.</i> , 2003	25	250	–
USA, Georgia rivers	Peeler, 2004	<d.l.	195.8	62.3, 152
USA, Dallas, river	Buszka <i>et al.</i> , 1994	1300	3200	–
Canada river	Metcalf <i>et al.</i> , 2003	14	45	–
USA, Wakulla, river	Peeler, 2004	–	–	97.3 -265.2
USA, Washington, river	Johnson <i>et al.</i> , 2004	–	1900	–
Switzerland alpine lakes	Berge <i>et al.</i> , 2003; Poiger <i>et al.</i> , 2003	<2	164	–
USA, Tallahassee lake	Peeler, 2004	–	–	9.4
USA, Nevada, lake	Boyd & Furlong, 2002	<d.l.	32	–
Caffeine in sea water				
USA, Boston, basin water	Siegener <i>et al.</i> , 2002	5.2	71	–
North Sea	Weigel <i>et al.</i> , 2002	2	16	–
Mediterranean sea, Spain	Berge <i>et al.</i> 2003, Poiger <i>et al.</i> 2003	<2	5	–
USA, Sarasota Bay	Peeler, 2004	<d.l.	123	–
Caffeine in marshes and spring waters				
USA, Georgia	Peeler, 2004	–	–	14.6, 134.1
Caffeine in groundwaters				
USA, Lemmon Valley, Nevada	Seiler <i>et al.</i> , 1999	–	–	230
USA, Sparks, Nevada	Seiler <i>et al.</i> , 1999	30	40	–
USA, Sarasota Bay	Peeler, 2004	<d.l.	223	–
Australia, Halls Head	Chen <i>et al.</i> , 2002	–	–	500
USA, Washington	Johnson <i>et al.</i> , 2004	< d.l.	3800	–
USA, Oregon	Hinkle <i>et al.</i> , 2005	<500	170000	–

Such an abundance of caffeine in water environments limits its use as anthropogenic marker to track the point source of a pollution, making it necessary to preliminarily assess the “base” environmental level of caffeine content. As a result, sample number and investigation costs are increased. But, in areas where human settlements are not widespread, as mountain basins are, caffeine detection, just because of its relative lability, pinpoints the input of wastewaters upstream the sampled point.

5. CAFFEINE CONCENTRATIONS DETECTED IN SURFACE AND GROUND WATER OF CENTRAL TRENTO PROVINCE

A cognitive screening of caffeine concentration in surface, ground and spring waters of Trento area was carried out. In a pair of instances we determined the molecule concentrations in areas where fecal pollution cases occurred. In Fig. 3 the position of the points sampled in Trento area is given. The sample collection was generally carried out during a low meteoric input period. To check the analytical methodology, some springs having their basin in wild areas, and for sure not polluted, were sampled (Trento Cimirlo, 850 m a.s.l., and Trambileno Acquenere, 675 m a.s.l.)

In table 2 the results of these preliminary analyses are given. We may point out the following.

Fersina river (tributary of Adige river) drains a mountain area where WWTPs are few, whereas a great number of on-site septic systems (Imhoff-type septic tanks, allowing the subsurface infiltration of treated waters via infiltration wells or absorption fields) occurs, along with treatment systems designed for small communities.

The caffeine concentrations detected in Fersina river water are quite high. The Cantanghel site essentially is a multiple drain system, tapping the water table of Fersina river, and built upstream a retention dam and at a depth of about 25 m below the surface. We may observe that the infiltration of river water through the alluvial bed does not induce a noticeable reduction of caffeine concentrations. The ground water of the alluvial fan of this river, downstream the retention dam (well Ghiaie 2), instead has much lower caffeine concentrations.

An analogous situation is found for Avisio river, draining the Dolomites area, where on-site septic systems are widespread too. Zambel site is a drain system tapping the water table of the river. Spini wells are located some kilometers downstream, on the alluvial fan of the river. Here the caffeine concentration shows variations in time, probably depending on river stage.

Some springs (Valdacole, Node, Camina, Ancona) are located in Trento, on the left valley side of Adige river, at about 500 m a.s.l. Urban settlements upstream these springs are partly connected to urban sewage system and partly use on-site septic systems. Caffeine concentrations observed are pretty low.

Ravina (Trento neighborhood) wells draw ground water from Gola river alluvial fan. There, caffeine is detected in ground water, at low concentrations.

Spino spring is a karstic spring whose water is collected for the Rovereto water supply. At the sampling time, the spring was polluted by fecal coliforms and bacteria, due to summer sheep grazing in the spring recharge area (about 1800 m a.s.l.). In the same area there are only a few buildings and one mountain dew, whose waste waters are treated with an high-technology system and then carried away by a tanker. We did not detect caffeine in the spring water. Such an information may be not substantial indeed, as the spring discharge is high enough to ensure a strong dilution.

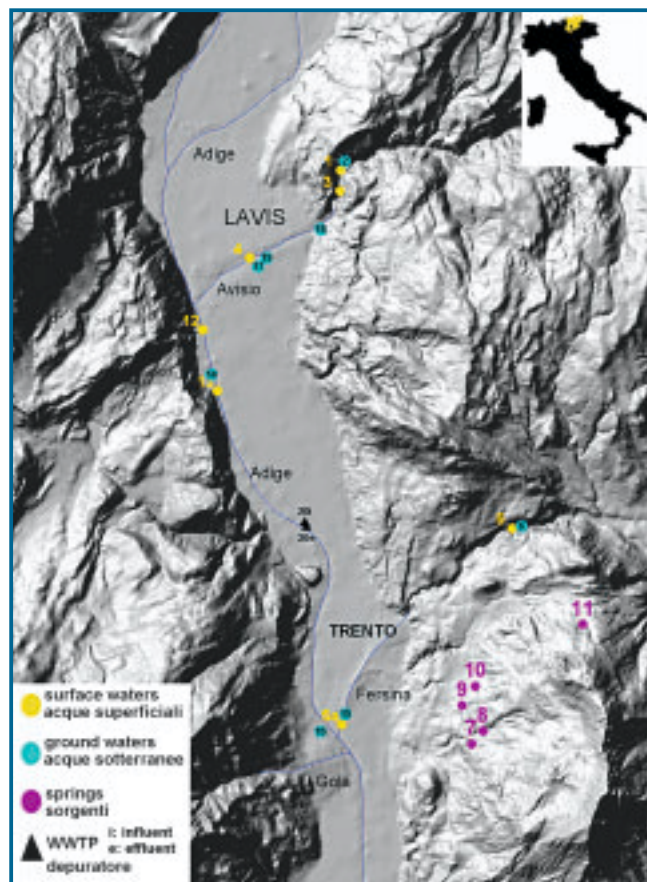


Fig. 3 - Location of the sampled points near Trento. Numbers refer to table 2. Scale: image width is equal to 13.2 km.

Ubicazione dei punti campionati presso la città di Trento. I numeri fanno riferimento alla tabella 2. Scala: la larghezza dell'immagine è pari a 13.2 km.

Table 2 - Caffeine in surface and ground waters of central Trentino.

Nr.	Sampling location	Sample type	Sampling date	ng/l	Sample Volume l
1	Lavis, Avisio	river	03/10/2005	47	5
2	Lavis, Zambel	Avisio river water table	03/10/2005	44	5
3	Lavis, Avisio, upstream urban area	river	04/01/2006	96	10
4	Lavis, Avisio downstream urban area	river	04/01/2006	116	10
5	Trento, Fersina	river	03/10/2005	84	5
5a	Trento, Fersina	river	28/11/2005	74	10
6	Trento, Cantanghel	Fersina river water table	03/10/2005	51	5
7	Trento, Node	spring	04/11/2005	7	10
8	Trento, Valdacole	spring	04/11/2005	7	10
9	Trento, Camina	spring	04/11/2005	0	10
10	Trento, Ancona	spring	04/11/2005	traces	10
11	Trento, Cimirlo	spring	04/10/2005	0	10
12	Adige river, upstream landfill site	river	22/11/2005	30	10
13	Adige river, downstream landfill site	river	22/11/2005	30	10
14	Piezometer, Adige river side, at landfill	ground water	22/11/2005	4	10
15	Well Chiaie 2	ground water	28/11/2005	7	10
16	Wells, Ravina 1-3	ground water	28/11/2005	4	10
17	Wells, Spini	ground water	17/11/2005	280	10
17a	Wells, Spini	ground water	22/11/2005	34	10
17b	Wells, Spini	ground water	04/01/2006	3	10
18	Piezometer 2 Avisio	ground water	04/01/2006	3	10
19	Piezometer MSPI1 Avisio	ground water	04/01/2006	2	10
20i	northernTrento WWTP	WWTP influent	12/01/2006	39000	10
20e	northernTrento WWTP	WWTP effluent	03/10/2005	<5	5
21	Rovereto, Spino	spring	03/10/2005	0	5
22	Avio, Cunettone sx	spring	12/09/2005	48	5
23	Trento, Acquaviva	spring	04/11/2005	traces	10
24	Terragnolo, Acque Nere	spring	06/10/2005	0	10

Cunettone spring, located at 1278 m a.s.l. on the eastern flank of Monte Baldo, has a quite low discharge; at sampling time the spring was subject to fecal pollution (occurring after summer storms), but in its small basin cattle grazing was prohibited and, in fact, absent. Caffeine concentrations detected in its water were high enough to induce us to ask for optical tracers investigations in a location near the mountain ridge, external to the spring basin, having important summer turistic influx (cableway). That because the scarce settlement in the spring basin does not justify such a strong caffeine input. An anthropogenic pollution component is anyway in this case undoubtable.

6. CONCLUSIONS

After the screening results, we may point out that the caffeine molecule:

- is ubiquitous in valley bottom surface and ground water;
- is absent in springs at high-medium altitude;
- is detected in higher concentrations in waters coming from basins where on-site treatment systems are more widespread;
- may be searched for in spring waters of mountain basins, to highlight the anthropic

origin of microbiological pollution, due to discharge of untreated or incorrectly treated wastewaters.

Caffeine analysis in hydrogeology can be used for many purposes.

It can be applied to track microbiological pollutions back to the source (sewer systems leakages, domestic septic systems not properly working, etc.), and could be a legal evidence for that.

Another important use is in the study of ground-water-surface water interactions.

The detection of high caffeine concentrations in river basins could be pointed out to advice for the development of widespread wastewater collection systems, to avoid the cumulative impacts on groundwaters of an excessive density of domestic treatment systems.

Caffeine analysis could be useful in the assessment of the qualitative state of an aquifer, notably for evaluating the impact of human settlements on it.

Investigations on caffeine concentrations in waters could be also used in economic hydrogeology, to appraise the value of a mineral water: would you judge worth your money a bottled mineral water in which caffeine is detectable?

Lastly, the authors, with the Geological Service of Autonomous Province of Trento, are testing the use of caffeine as a new tracer for applied hydrogeology investigations.

An environmental remark: if caffeine is detected in surface and ground waters, then there will be present also some out of a number of PhACs and PCPs, which, as caffeine, reach the water environment through wastewaters, and whose impact on the environment and human health is not yet known. It is recognized that existing WWTP are not designed to remove these pollutants from wastewaters and this is particularly true for on-site systems. In the future, it will be needed to enhance the efforts centered on the minimization of organic pollutants disposition in wastewaters and improve the engineering treatment technologies. Inaction in this concern may jeopardize the viability of reuse of wastewaters, especially for aquifer recharge.

REFERENCES

- BARBER L.B. (2002): *Water-quality data for pharmaceuticals, hormones, and other organic wastewater contaminants in U.S. streams, 199-2000*. USGS Open-File Report 02-94.
- BARBER L.B., LEENHEER J.A., PEREIRA W.E., NOYES T.I., BROWN G.K., TABOR C.F., WRITER J.H. (1995): *Organic contamination of the Mississippi river from municipal and industrial wastewater*. USGS Circular 1133.
- BARNES K.K., CHRISTENSON S.C., KOLPIN D.W., FOCazio M.J., FURLONG E.T., ZAUGG S.D., MEYER M.T., BARBER L.B. (2004): *Pharmaceuticals and other organic waste water contaminants within a leachate plume downgradient of a municipal landfill*. Ground Water Monitoring and Remediation, 24(2), 119-126.
- BARONE J.J., ROBERTS H.R. (1996): *Caffeine consumption*. Food Chemistry and Toxicology 34(1): 119-129.
- BOYD R.A., FURLONG E.T. (2002): *Human-health pharmaceutical compounds in Lake Mead, Nevada and Arizona, and Las Vegas Wash, Nevada, October 2000–August 2001*. U.S. Geological Survey Open File Report 02-385.
- BASIN (2003): *Information on Water Quality Parameters*. <http://bcn.boulder.co.us/basin/data/FECAL/info/index.html>, City of Boulder/USGS Water Quality Monitoring.
- BUERGE I.J., POIGER T., MULLER M.D., BUSER H.R. (2003): *Caffeine, an anthropogenic marker for wastewater contamination of surface waters*. Environmental Science and Technology, 37, 691-700.
- BURKHARDT M.R., SOLIVEN P.P., WERNER S.L., VAUGHT D.G. (1999): *Determination of sub-microgram-per-liter concentrations of caffeine in surface water and groundwater samples by solid-phase extraction and liquid chromatography*. Journal of AOAC International 82(1), 161-166.
- BUSZKA P.M., BARBER L.B., SCHROEDER M.P., BECKER L.D. (1994): *Organic compounds downstream from a treated-wastewater discharge near Dallas, Texas, March 1987*. USGS Water-Resources Investigations Report 93-4194.
- CHEMFINDER (2004): *Caffeine*. <http://chemfinder.cambridge-soft.com/result.asp>, ChemFinder.com. 2004.
- CHEN Z., PAVELIC P., DILLON P., NAIDU R. (2002): *Determination of caffeine as a tracer of sewage effluent in natural waters by on-line solid-phase extraction and liquid chromatography with diode-array detection*. Water Research 36(19), 4830-4838.
- CLARK L.B., ROSEN R.T., HARTMAN T.G., ALAIMO L.H., LOUIS J.B., HERTZ C., HO C.T., ROSEN J.D. (1991): *Determination of nonregulated pollutants in three New Jersey Publicly Owned Treatment Works (POTWs)*. Research Journal WPCF 63(2), 104-113.
- DREWES J. E., HEBERER T., RAUCH T., REDDERSEN K. (2003): *Fate of pharmaceuticals during ground water recharge*. Ground Water Monitoring and Remediation 23(3), 64-72.
- FUGANTI A., MOELLER P., MORTEANI G., DULSKI P. (1996): *Gadolinio ed altre terre rare usabili come traccianti per stabilire l'età, il movimento ed i rischi delle acque sotterranee: esempio dell'area di Trento*. Geologia tecnica & ambientale, 4: 13-18.
- HEBERER T. (2002): *Tracking persistent pharmaceutical residues from municipal sewage to drinking water*. Journal of Hydrology 266: 175-189.
- HINKLE S.R., WEICK R.J., JOHNSON J.M., CAHILL J.D., SMITH S.J., RICH B.J. (2005): *Organic wastewater compounds, pharmaceuticals, and coliphage in groundwater receiving discharge from onsite wastewater treatment systems near La Pine, Oregon: Occurrence and implications for transport*. Oregon Department of Environmental Quality Portland, Oregon.

- KOLPIN D.W., FURLONG E.T., MEYER M.T., THURMAN E.M., ZAUGG S.D., LARRY I., BARBER B., BUXTON H.T. (2002): *Pharmaceuticals, hormones, and other organic wastewater contaminants in U.S. streams 1999-2000: A National reconnaissance*. Environmental Science and Technology 36, 1202-1211.
- JOHNSON A., CAREY B., GOLDING S. (2004): *Results of a screening analysis for pharmaceuticals in wastewater treatment plant effluents, wells, and creeks in the Sequim-Dungeness area*. Washington State Department of Ecology, publ. n. 04-03-051.
- MAYO-CLINIC (2003): *Caffeine Content of Common Beverages*. <http://www.mayoclinic.com/health/caffeine/AN01211>
- METCALFE C.D., MIAO X.S., KOENIG B.G., STRUGER J. (2003): *Distribution of acidic and neutral drugs in surface waters near sewage treatment plants in the Lower Great Lakes, Canada*. Environmental Toxicology and Chemistry 22(12), 2881-2889.
- PEELER K.A. (2004): *Caffeine as an anthropogenic source indicator in freshwater and marine systems*. Florida State University Thesis. etd.lib.fsu.edu/theses/available/etd-11032004-131319/unrestricted/01_kap_thesis.pdf peeler@ocean.fsu.edu
- POIGER T., BUSER H.R., MULLER M.D., BALMER M.E., BUERGE I.J. (2003): *Occurrence and fate of organic micro-pollutants in the environment: regional mass balances and source apportioning in surface waters based on laboratory incubation studies in soil and water, monitoring and computer modeling*. Chimia 57: 492-498.
- REGINATTO F.H., ATHAYDE M.L., GOSMANN G., SCHENKEL E.P. (1999): *Methylxanthines accumulation in Ilex species - Caffeine and theobromine in erva-mate (Ilex paraguariensis) and other Ilex species*. J. Braz. Chem. Soc., Vol. 10, No. 6, 443-446.
- SEILER R.L., ZAUGG S.D., THOMAS J.M., HOWCROFT D.L. (1999): *Caffeine and pharmaceuticals as indicators of waste water contamination in wells*. Ground Water 37(3), 405-410.
- SIEGENER R., CHEN R.F. (2002): *Caffeine in Boston harbor seawater*. Marine Pollution Bulletin 44, 383-387.
- ZUCCATO E., CHIABRANDO C., CASTIGLIONI S., CALAMARI D., BAGNATI R., SCHIAREA S., FANELLI R. (2005): *Cocaine in surface waters: a new evidence-based tool to monitor community drug abuse*. Environmental Health: A Global Access Science Source 2005, 4: 14.
- WHO (1997): *Coffee, Tea, Mate, Methylxanthines, and Methylglyoxal*. Lyon, France, International Agency for Research on Cancer, World Health Organization: 291.

La caffeina come indicatore di contaminazione antropogenica delle acque sotterranee. Possibilità di applicazione nei bacini montani

1. INTRODUZIONE

Da alcuni anni si studia in occidente la possibilità di utilizzare la caffeina come tracciante della contaminazione delle acque superficiali e sotterranee da parte di acque reflue di origine urbana e domestica. Infatti la presenza della caffeina è una indicazione chiara e non ambigua della provenienza da acque reflue domestiche, essendo utilizzata e ingerita solo dagli esseri umani.

Le analisi sulla presenza della caffeina nelle acque superficiali e sotterranee sono state condotte nell'ultimo decennio e le ricerche erano sostanzialmente motivate da tre scopi:

1. individuare traccianti in grado di far attribuire univocamente ad acque reflue provenienti da sistemi di trattamento domestico o pubblico la contaminazione di acque superficiali o sotterranee e, in particolare, individuare i malfunzionamenti delle reti fognarie responsabili di casi di contaminazione delle reti di acque bianche.
2. dimostrare che la sorgente di contaminazioni da nitrati di acque sotterranee andava attribuita a sistemi di trattamento delle acque reflue, e non ad altre cause, come l'uso di fertilizzanti. Si possono citare a questo riguardo i lavori di SEILER *et al.* [1999] e di KOLPIN *et al.* [2001] che hanno condotto numerose campagne di campionamento di corsi d'acqua negli Stati Uniti. In particolare SEILER *et al.* [1999] hanno analizzato anche acque sotterranee, sia di pozzi privati che per approvvigionamento pubblico. Ultimamente PEELER [2004], in un lavoro espressamente dedicato alla caffeina in relazione con l'inquinamento di tipo microbiologico associato alle acque reflue, ha condotto campagne di campionamento in Florida e in Georgia, analizzando anche acque di sorgente.

3. definire il grado di concentrazione della molecola di caffeina nelle acque superficiali e sotterranee, ove essa recapita tramite le acque reflue, dopo essere stata consumata dall'uomo.

Ricerche aventi obiettivi simili sono attualmente condotte in tutto il mondo, utilizzando un crescente numero di markers chimici antropogenici. In particolare, vengono ricercate molecole di prodotti farmaceutici di varia natura ed i loro metaboliti (PhACs, Pharmaceutically Active Compounds), e prodotti per l'igiene personale (PCPs, Personal Care Products). Campionamenti ed indagini per queste molecole sono state svolte da BARBER *et al.* [1995], KOLPIN *et al.* [2002], HEBERER [2002], POIGER *et al.* [2003], JOHNSON *et al.* [2004], HINKLE *et al.* [2005]. FUGANTI *et al.* [1996] hanno applicato l'analisi del gadolinio (usato in clinica per l'imaging a risonanza magnetica) per valutare l'età delle acque sotterranee.

I risultati del campionamento delle molecole di origine antropogenica possono venire utilizzati per una indagine a ritroso, per valutare il consumo umano di molecole specifiche: nel 2005 ZUCCATO *et al.* hanno pubblicato stime del consumo di cocaina nel bacino del fiume Po, a partire dalle concentrazioni di cocaina nelle acque del Po e dei depuratori nel suo bacino.

Anche l'analisi della caffeina può essere utilizzata per valutazioni di tipo similare.

2. LE FONTI DI IMMISSIONE DELLA CAFFEINA NELL'AMBIENTE

In natura la caffeina è presente in più di 35 specie di piante, comprendenti caffè (*Coffea Arabica*), tè, cacao (*Theobroma, Camellia* spp.), Yerba Mate (*Ilex paraguariensis*) [REGINATTO *et al.*, 1999], Guaranà (*Paullinea cupana*), cola (*Kola nitida*), in genere tutte diffu-

se a latitudini tropicali e subtropicali. Viene segnalata la sua presenza in altre piante della famiglia *Ilex* (sp. *vornitoria*) [PEELER, 2004], ma per altre *Ilex* delle latitudini europee (come *Ilex aquifolium* ("pungitopo"), o *Ilex verticillata*) non risulta confermata in letteratura.

La caffeina è un componente di numerose bevande (caffè, tè, cola), e si trova nel cioccolato e nei prodotti dolciari che lo contengono. Viene utilizzata anche come componente in alcuni farmaci.

Una tazza di caffè può contenere, a seconda del tipo di tostatura e della preparazione, da 40 (espresso) a 135 (caffè all'americana) mg di caffeina, una tazza di tè da 30 a 50 mg, una bevanda alla cola da 34 a 46 mg per dose [MAYO CLINIC, 2003].

Si stima che il consumo medio globale di caffeina sia di 70 milligrammi al giorno per individuo [WHO, 1997]. Nell'organismo umano la caffeina viene metabolizzata nel fegato, e solo una percentuale ridotta (dal 0.5% al 10% della quantità assunta) viene escreta attraverso le urine [SEILER *et al.*, 1999, SIEGENER & CHEN, 2002]. Essendo il consumo di caffeina pressoché universale, nelle aree ad alta densità di popolazione la concentrazione di caffeina nelle acque reflue diviene rilevante ed osservabile.

L'immissione della caffeina nell'ambiente naturale avviene principalmente seguendo i percorsi delle acque reflue domestiche: scarichi fognari, fosse settiche ed impianti di trattamento dei reflui urbani. Una parte dei residui della preparazione delle bevande stimolanti (caffè, tè) è invece conferita come rifiuto urbano, frazione umida. Quindi costituiscono altre possibili fonti di immissione nell'ambiente i percolati di discarica di rifiuti solidi urbani e il prodotto degli impianti di compostaggio (municipali o familiari). Inoltre, in alcuni casi, i residui della preparazione del caffè sono usati nel giardinaggio domestico e possono quindi infiltrarsi nel suolo. Tutti questi punti di immissione sono comunque riconducibili ad attività ed insediamenti umani, e la caffeina senza alcun dubbio va considerata come marker antropogenico.

3. METODICA ANALITICA

Le moderne tecniche di analisi chimica consentono di rilevare la presenza di caffeina in concentrazioni dell'ordine dei nanogrammi per litro (10^{-9} gr/l). La metodica è relativamente semplice, ed i costi analitici sono contenuti. Per il campionamento si raccomanda il prelievo di una buona quantità d'acqua. Nei primi tempi della nostra ricerca i campioni avevano un volume di 5 litri. Poiché la sensibilità analitica aumenta con l'aumentare delle quantità di campione trattate, nell'ultimo periodo della ricerca abbiamo spinto il limite di rilevabilità utilizzando campioni da 10 litri. Il campionamento e le analisi vanno eseguiti con grande attenzione per evitare contaminazioni del campione (il personale dovrebbe indossare guanti e maschere facciali, ed evitare l'assunzione di caffè o tè). L'analisi va fatta entro pochi giorni, in quanto la molecola si degrada per fotolisi e con il tempo. Tutte le determinazioni sono state effettuate con un sistema HPLC (High Performance Liquid Chromatography) Dionex, con un sistema automatizzato di trattamento del campione Aspec XL della Gilson ed un DAD (Diode Array Detector). Il sistema analitico è controllato da un elaboratore elettronico. Per l'arricchimento del campione e la pulizia sono state utilizzate cartucce Isolute EMV+, e per la separazione della caffeina si è usata una colonna cromatografica Dionex C18 (250x4mm). La fase di condizionamento è stata effettuata sequenzialmente, con 5 ml di metanolo e 5 ml di acqua deionizzata, a 2.5 ml/min. In seguito, il campione d'acqua veniva passato a 10 ml/min. Infine, il residuo trattenuto veniva eluito con 5 ml CH_2Cl_2 , asciugato con azoto e recuperato con 1 ml di fase mobile (tampono fosfato pH 2.8 – acetonitrile 85:15). La caffeina nelle acque veniva confermata confrontando la sua purezza spettrale con quella di uno standard caffeina, e l'identificazione era anche basata sul suo tempo di ritenzione. La quantificazione è ottenuta mediante confronto con una concentrazione nota di caffeina.

4. DESTINO AMBIENTALE DELLA CAFFEINA E CONCENTRAZIONI RILEVATE IN DIVERSI AMBIENTI IDRICI

L'evoluzione della caffeina nell'ambiente è descritta in letteratura.

Gli impianti di trattamento delle acque reflue urbane (Waste Water Treatment Plants WWTP) abbattano considerevolmente le concentrazioni di caffeina delle acque superficiali. L'abbattimento è attribuito a degradazione microbica. HEBERER [2002] rileva un abbattimento pressoché totale (>99%) della caffeina ai depuratori della città di Berlino; anche POIGER *et al.* [2003] osservano simili percentuali di abbattimento nella maggior parte dei WWTPs campionati, ed indicano che una minor efficienza dei depuratori (80.9-97.3%) nell'abbattimento della caffeina è dovuta a una minore età dei fanghi trattati.

Tuttavia, nei fiumi degli Stati Uniti le concentrazioni maggiori di caffeina sono state osservate negli effluenti dai WWTPs o nelle acque superficiali immediatamente a valle di questi. Proseguendo verso valle le concentrazioni diminuiscono, ed il meccanismo di abbattimento più efficace appare costituito dalla progressiva diluizione.

BUERGE *et al.* [2002] e POIGER *et al.* [2003] ritengono di secondaria importanza per la degradazione della caffeina sia la degradazione biologicamente mediata che la fotodegradazione, ma PEELER [2004] dimostra che l'esposizione dei campioni alla luce ed alle variazioni di temperatura porta effettivamente ad una diminuzione delle concentrazioni e cita precedenti esperienze di laboratorio in merito alla persistenza della caffeina nei campioni. La custodia dei campioni al buio e alle basse temperature (4-5 °C) appare essere una pratica raccomandabile; le analisi dovrebbero essere effettuate entro 3-4 giorni dal campionamento e dalla consegna in laboratorio.

La presenza della caffeina appare ubiquitaria nelle zone poste a valle di aree popolate: essa è stata rilevata, con concentrazioni variabili, in acque di torrenti, laghi, sorgenti, pozzi ed anche in acque marine. POIGER *et al.* [2003] hanno persino dimostrato una correlazione tra le concentrazioni di caffeina in acque di laghi svizzeri con la popolazione residente nei rispettivi bacini imbriferi. In Tabella 1 vengono riportati i dati analitici di letteratura per le acque in ingresso e in uscita ai WWTPs, le acque di fiumi e laghi, le acque marine, le acque sorgive e di marcite, e per le acque sotterranee.

Questa diffusione della caffeina nell'ambiente idrico ne limita il possibile utilizzo come marker antropogenico per individuare le fonti di un inquinamento puntuale da acque reflue e rende necessaria la valutazione preliminare del "fondo" ambientale, aumentando il numero di campioni da raccogliere ed i costi. D'altra parte, in aree dove gli insediamenti umani non sono diffusi, come i bacini montani, la sua individuazione rende certi, proprio per la sua relativa labilità, di una immissione di reflui a monte del punto campionato.

5. LE CONCENTRAZIONI DI CAFFEINA RILEVATE NELLE ACQUE SUPERFICIALI E SOTTERANEE DEL TRENTINO CENTRALE

È stato avviato uno screening conoscitivo delle concentrazioni di caffeina nelle acque superficiali, sotterranee e di sorgente nella zona di Trento. In un paio di occasioni abbiamo voluto determinare le concentrazioni della molecola in aree con situazioni di contaminazione fecale. In figura 3 è riportata l'ubicazione dei punti campionati presso la città di Trento. Il campionamento è generalmente avvenuto in un periodo in cui le precipitazioni meteoriche sono state scarse. A scopo di controllo della metodologia analitica sono state campionate anche sorgenti con bacino in aree disabitate e sicuramente non contaminate (Trento Cimirolo, 850 m s.l.m., e Trambileno Acquenere, 675 m s.l.m.).

Tabella 1 - Dati analitici di letteratura sulla caffeina nelle acque.

Località di campionamento	Referimento bibliografico	Min ng/l	Max ng/l	Valore medio o da singolo campione ng/l
Caffeina nelle acque in ingresso a depuratori				
Germania, Berlino	Heberer, 2002	–	640000	230000
USA, Boston	Siegener <i>et al.</i> , 2002	–	–	20000
Svizzera	Berge <i>et al.</i> , 2003; Poiger <i>et al.</i> , 2003	7000	73000	–
Caffeina nelle acque in uscita da depuratori				
Germania, Berlino	Heberer, 2002	–	3000	180
USA, Boston	Siegener <i>et al.</i> , 2002	–	–	6700
Svizzera	Berge <i>et al.</i> , 2003; Poiger <i>et al.</i> , 2003	28.9	9480	–
USA	Drewes <i>et al.</i> , 2003	–	–	15700
Canada	Metcalf <i>et al.</i> , 2003	22	677	–
USA Tallahassee	Peeler, 2004	–	–	193.4
USA, Washington	Johnson <i>et al.</i> , 2004	21000	30000	–
USA, Oregon	Hinkle <i>et al.</i> , 2005	<500	320000	49000
Caffeina in acque di fiumi e laghi				
USA, fiumi	Kolpin <i>et al.</i> , 2002	<d.l.	6000000	81
Svizzera, fiumi	Berge <i>et al.</i> , 2003; Poiger <i>et al.</i> , 2003	25	250	–
USA, Georgia, fiumi	Peeler, 2004	<d.l.	195.8	62.3, 152
USA, Dallas, fiume	Buszka <i>et al.</i> , 1994	1300	3200	–
Canada, fiumi	Metcalf <i>et al.</i> , 2003	14	45	–
USA, Wakulla, fiume	Peeler, 2004	–	–	97.3 -265.2
USA, Washington, fiumi	Johnson <i>et al.</i> , 2004	–	1900	–
Svizzera, laghi alpini	Berge <i>et al.</i> , 2003; Poiger <i>et al.</i> , 2003	<2	164	–
USA, lago Tallahassee	Peeler, 2004	–	–	9.4
USA, Nevada, lago	Boyd & Furlong, 2002	<d.l.	32	–
Caffeina in acque marine				
USA, Boston, acqua di bacino	Siegener <i>et al.</i> , 2002	5.2	71	–
North Sea	Weigel <i>et al.</i> , 2002	2	16	–
Mar Mediterraneo, Spagna	Berge <i>et al.</i> 2003, Poiger <i>et al.</i> 2003	<2	5	–
USA, Sarasota Bay	Peeler, 2004	<d.l.	123	–
Caffeine in acque di sorgente e di marcite				
USA, Georgia	Peeler, 2004	–	–	14.6, 134.1
Caffeina in acque sotterranee				
USA, Lemmon Valley, Nevada	Seiler <i>et al.</i> , 1999	–	–	230
USA, Sparks, Nevada	Seiler <i>et al.</i> , 1999	30	40	–
USA, Sarasota Bay	Peeler, 2004	<d.l.	223	–
Australia, Halls Head	Chen <i>et al.</i> , 2002	–	–	500
USA, Washington	Johnson <i>et al.</i> , 2004	< d.l.	3800	–
USA, Oregon	Hinkle <i>et al.</i> , 2005	<500	170000	–

In Tabella 2 sono riportati i risultati di queste prime determinazioni. Possiamo evidenziare quanto segue.

Le acque del torrente Fersina, affluente di sinistra del fiume Adige, drenano una zona montuosa con pochi WWTPs, mentre sono diffusissimi gli impianti di depurazione a servizio di singoli edifici (fosse tipo Imhoff con dispersione in sottosuolo con pozzi perdenti o per subirrigazione) e depuratori di piccole dimensioni per le comunità. La concentrazione di caffeina rilevata nel torrente è piuttosto alta. La captazione Cantanghel è sostanzialmente un sistema di captazione a drenaggi multipli delle acque di subalveo di questo torrente, a monte di una diga di ritenuta e a una profondità di circa 25 m dalla superficie. Come si vede, l'attraversamento del materasso alluvionale del torrente non riduce di molto le concentrazioni di caffeina nell'acqua. L'acqua sotterranea del conoide alluvionale di questo torrente (pozzo Ghiaie 2), a valle della diga di ritenuta, ha invece concentrazioni molto inferiori di caffeina.

Una situazione analoga si presenta per le acque del torrente Avisio, che drena le valli dolomitiche, in cui pure sono numerosi gli impianti di trattamento domestici. La captazione Zambel è un drenaggio subalveo delle acque di questo torrente. I pozzi Spini si trovano alcuni chilometri a valle, nel conoide alluvionale del torrente. Qui la concentrazione di caffeina varia nel tempo, probabilmente in funzione dell'alimentazione subalvea dal torrente.

Alcune sorgenti (Valdacole, Node, Camina, Ancona) si trovano a circa 500 m s.l.m. sul fianco sinistro della valle dell'Adige, nella città di Trento. Gli insediamenti sovrastanti le sorgenti sono in parte serviti da fognatura pubblica, e in parte usano fosse settiche. I valori di caffeina osservati sono piuttosto bassi.

I pozzi Ravina (frazione di Trento) captano acque sotterranee del conoide alluvionale del rio Gola. Anche qui la caffeina è presente, ma con valori bassi.

La sorgente Spino è un'emergenza carsica che alimenta l'ac-

Tabella 2 - Caffeina nelle acque superficiali e sotterranee del Trentino centrale.

Nr.	Località	Tipo di acqua	Data campionamento	ng/l	Volume campione (l)
1	Lavis, Avisio	torrente	03/10/2005	47	5
2	Lavis, Zambel	subalveo torrente Alvisio	03/10/2005	44	5
3	Lavis, Avisio, a monte dell'abitato	torrente	04/01/2006	96	10
4	Lavis, Avisio, a valle dell'abitato	torrente	04/01/2006	116	10
5	Trento, Fersina	torrente	03/10/2005	84	5
5a	Trento, Fersina	torrente	28/11/2005	74	10
6	Trento, Cantanghel	subalveo torrente Fersina	03/10/2005	51	5
7	Trento, Node	sorgente	04/11/2005	7	10
8	Trento, Valdacole	sorgente	04/11/2005	7	10
9	Trento, Camina	sorgente	04/11/2005	0	10
10	Trento, Ancona	sorgente	04/11/2005	tracce	10
11	Trento, Cimirlo	sorgente	04/10/2005	0	10
12	Fiume Adige, a monte discarica	fiume	22/11/2005	30	10
13	Fiume Adige, a valle discarica	fiume	22/11/2005	30	10
14	Piezometro arginale Adige discarica	acqua sotterranea	22/11/2005	4	10
15	Pozzo Ghiaie 2	acqua sotterranea	28/11/2005	7	10
16	Pozzi Ravina 1-3	acqua sotterranea	28/11/2005	4	10
17	Pozzi Spini	acqua sotterranea	17/11/2005	280	10
17a	Pozzi Spini	acqua sotterranea	22/11/2005	34	10
17b	Pozzi Spini	acqua sotterranea	04/01/2006	3	10
18	Piezometro 2 Avisio	acqua sotterranea	04/01/2006	3	10
19	Piezometro MSP11 Avisio	acqua sotterranea	04/01/2006	2	10
20i	Depuratore TN nord	affluente al depuratore	12/01/2006	39000	10
20e	Depuratore TN nord	effluente depuratore	03/10/2005	<5	5
21	Rovereto, Spino	sorgente	03/10/2005	0	5
22	Avio, Cunettone sx	sorgente	12/09/2005	48	5
23	Trento, Acquaviva	sorgente	04/11/2005	tracce	10
24	Terragnolo, Acque Nere	sorgente	06/10/2005	0	10

quedotto di Rovereto. Nel periodo del campionamento la sorgente era contaminata da coli e batteri di origine fecale dovuti allo stazzo estivo di bestiame nella sua area di ricarica (circa 1800 m s.l.m.). In questa sono presenti pochi edifici ed un rifugio, servito da un depuratore ad alta tecnologia, le cui acque reflue vengono allontanate con autobotte. Non si è rilevata caffeina; questa informazione potrebbe tuttavia essere poco significativa, in quanto le portate sorgive sono tali da garantire una forte diluizione.

La sorgente Cunettone, posta a 1278 m s.l.m. sulle pendici orientali del monte Baldo, ha portate piuttosto basse; nel periodo del campionamento era soggetta ad inquinamenti da coliformi fecali (che avvenivano a seguito di temporali estivi), sebbene nel suo piccolo bacino imbrifero il pascolo fosse interdetto e, di fatto, assente. Le concentrazioni di caffeina rilevate sono elevate, tali da indurci a chiedere di effettuare indagini con traccianti ottici in una zona ad alto afflusso turistico estivo sul crinale del monte (cabinovia), posta al di fuori del bacino imbrifero. Questo perché le ridotte presenze insediative nel bacino della sorgente non appaiono sufficienti per giustificare una così forte immissione della molecola. Una componente antropica nella contaminazione è comunque indubbia.

6. CONCLUSIONI

Al termine dello screening, possiamo evidenziare che la molecola della caffeina:

- è ubiquitaria nelle acque superficiali e nelle acque sotterranee di fondovalle;
- è assente nelle sorgenti di quota medio-alta;
- presenta concentrazioni superiori nelle acque provenienti da bacini con maggior numero di impianti di trattamento domestici;
- può essere ricercata nelle acque di sorgente per evidenziare l'origine antropica di contaminazioni microbiologiche, a causa di sversamenti di acque reflue non trattate o malamente trattate.

L'analisi della caffeina può essere utilizzata in idrogeologia per molti scopi.

Può essere usata per il rintracciamento dell'origine di inquinamenti microbiologici (perdite delle reti fognarie, fosse settiche non funzionanti correttamente, ecc.), e potrebbe costituire una prova legale in merito. Un'altra importante applicazione è nel suo uso per lo studio delle relazioni tra acque sotterranee e acque superficiali.

La rilevazione di alte concentrazioni di caffeina nei bacini fluviali può essere evidenziata per suggerire la costruzione di impianti di collettamento delle acque reflue capillarmente distribuiti, per evitare gli impatti cumulativi sulle acque sotterranee di una eccessiva densità di impianti di trattamento domestico.

L'analisi della caffeina nelle acque può essere di aiuto nella valutazione dello stato qualitativo di un acquifero, in particolare per quantificare l'impatto su di esso degli insediamenti antropici.

Indagini sulle concentrazioni di caffeina nelle acque possono essere utilizzate anche in idrogeologia economica, per definire il pregio delle acque minerali: spendereste i vostri soldi per un'acqua minerale in cui sia rilevabile caffeina?

Infine, gli autori, con il Servizio Geologico della Provincia Autonoma di Trento, stanno sperimentando l'uso della caffeina come nuovo tracciante in studi di idrogeologia applicata.

Una considerazione di carattere ambientale: se nelle acque superficiali e sotterranee viene individuata la caffeina, allora saranno in genere presenti anche alcuni dei tanti inquinanti, PhACs e PCPs, che, come la caffeina, giungono all'ambiente idrico attraverso le acque reflue e di cui non è ancora noto l'impatto sull'ambiente e sulla salute umana. È noto che gli esistenti impianti di depurazione delle acque reflue non sono progettati per rimuovere questi composti e questo vale in particolare per gli impianti privati di piccole dimensioni. Per il futuro sarà necessario intraprendere politiche volte a minimizzare l'introduzione di inquinanti organici nelle acque reflue e a migliorare le capacità di trattamento degli impianti. L'inazione in questo senso potrebbe infatti pregiudicare le possibilità di riutilizzo delle acque reflue, soprattutto per la ricarica degli acquiferi.