



Forest tree failures along peri-urban roads: a multidisciplinary perspective to analyze predisposing and triggering factors¹

Luigi Portoghesi ^{(a)(*)} - Federico Valerio Moresi ^(a) - Emanuela Masini ^(a) - Antonio Tomao ^(b)
Mariagrazia Agrimi ^(a)

¹ This research was funded by the MIUR project “EUFORICC” – Establishing Urban Forest Based Solutions in Changing Cities (PRIN 20173RRN2S: “Projects of National Interest”).

^(a) Department for Innovation in Biological, Agro-food and Forest systems, University of Tuscia.

^(b) Department of Agricultural, Food, Environmental and Animal Sciences, University of Udine.

^(*) Corresponding Author; lporto@unitus.it

Abstract: Tree failures in forest ecosystems are part of their natural dynamics. However, when these events occur in an urban area or along the wooded strips of very high-traffic peri-urban roads, they become traumatic events that can cause damage to people and things and must be prevented. Therefore, this type of event constitutes an ecosystem disservice since it is perceived as something negative that puts people’s well-being and safety at risk. There are various factors, often concomitant, that can cause a tree failure. Information obtained from meteorological data, geotechnical, geophysical and dendrometric surveys were combined to better understand the causes that led to the collapse of trees from wooded strips along a highly frequented peri-urban road in Central Italy. The article reports the main results of the multidisciplinary investigations carried out. Some conclusions were drawn and some management hypotheses to prevent tree fallings onto the road were presented.

Key words: tree failure; windstorm; ecosystem disservices; analysis of predisposing and triggering factors; multidisciplinary approach.

Citation: Portoghesi L., Moresi F.V., Masini E., Tomao A., Agrimi M., 2024 - *Forest tree failures along peri-urban roads: a multidisciplinary perspective to analyze predisposing and triggering factors*. L’Italia Forestale e Montana, 79 (2): 43-58; <https://dx.doi.org/10.36253/ifm-1129>

Received: 18/04/2024 **Revised version:** 27/06/2024 **Published online:** 26/07/2024

1. INTRODUCTION

The fall of one or more trees in a forest due to abiotic or biotic factors is part of the natural dynamics of the ecosystem as are the feedbacks by which it reacts in order not to lose its integrity (Johnson and Miyanishi, 2007; Battisti *et al.*, 2016).

However, trees falling in forests located near heavily travelled roads in urban or peri-urban areas are traumatic events that should not occur due to their high potential to cause death, serious injury or damage. Citizens are aware that urban and peri-urban tree failure can affect their well-being and safety and therefore tree failure is regarded

as an ecosystem disservice (Shackleton *et al.*, 2016; Roman *et al.*, 2020).

The likelihood of tree failure is particularly high in strong winds. Extreme wind events and weather phenomena are expected to increase in intensity and frequency across Europe (Antonescu *et al.*, 2017; Groenemeijer *et al.*, 2017) and will probably escalate even more as Earth's climate changes (Cavicchia *et al.*, 2014; Spinoni *et al.*, 2020). In particular, extreme wind events are becoming more and more common in Italy which is the European country most at risk of climate-related home damage and the second European country with the most reported deaths and injuries caused by tornadoes (Antonescu *et al.*, 2017; Pipinato, 2017; Canessa, 2019).

Generally speaking, any tree can fall if wind speeds reach over 90-100 km/h (approximately 30 m/s; Cullen, 2002; Virost *et al.*, 2016). Strong gusty winds may initiate windthrow. If the resistance offered by the stem is overcome, the tree breaks; if, however, the root system gives way, the tree is uprooted.

Whether a tree can withstand very strong winds or is windthrown before the wind reaches the aforementioned threshold of intensity depends on various factors such as the mechanical properties of the stem and crown and the roots that anchor the tree to the ground. These factors are in turn influenced by the topographic, climatic and soil characteristics of the site, and/or by the dendrometric attributes and the state of health of the tree and/or the stand where the tree is located.

All of these factors must be carefully analyzed when evaluating the level of danger and risks that an unstable tree may pose to both people and property. It is therefore essential to reduce wind damage to individual trees and forest stands situated near buildings or stretches of urban and peri-urban roads by making effective forest management deci-

sions (Pokorny, 1992; Sani, 2017; Linhares *et al.*, 2021).

The article illustrates the multidisciplinary approach used in a case study on forest strips along the verge of two stretches of heavily travelled peri-urban road. During wind storms some trees have fallen onto the road in recent years, blocking the road and damaging passing cars. The landowner disputed the claim that the fallen trees were weakened by stem or root decay. For this reason, other factors believed to affect the stability of the trees along the edge of the forest were investigated, such as the climatic conditions of the location, the terrain morphology, the physical characteristics of the soil and the overall structure of the forest stand. The aim of the study was to gain a deeper understanding of what causes a tree to fall and implement risk management strategies to prevent tree failures from endangering public safety during wind storms.

2. STUDY AREA

The study area is located in the municipality of Manziana, about 60 km northwest of Rome (42° 7' 59" N; 12° 7' 38" E) and consists of forest strips that run along both sides of the 2c provincial road (SP 2c) for approximately 1.5 km, starting from the provincial road Braccianese-Claudia (SP 493) road junction, and a short stretch of the SP 493 towards the town of Bracciano (Figure 1). Both of these stretches of road are characterized by high traffic volumes.

The geological substrate in the study area is represented by the Sabatino Volcanic District (De Rita *et al.*, 1996). The terrain's morphological features suggest a mild gradient.

The hills are not generally high in this area and are interspersed with torrential valleys. More specifically, the segment of the SP 2c in

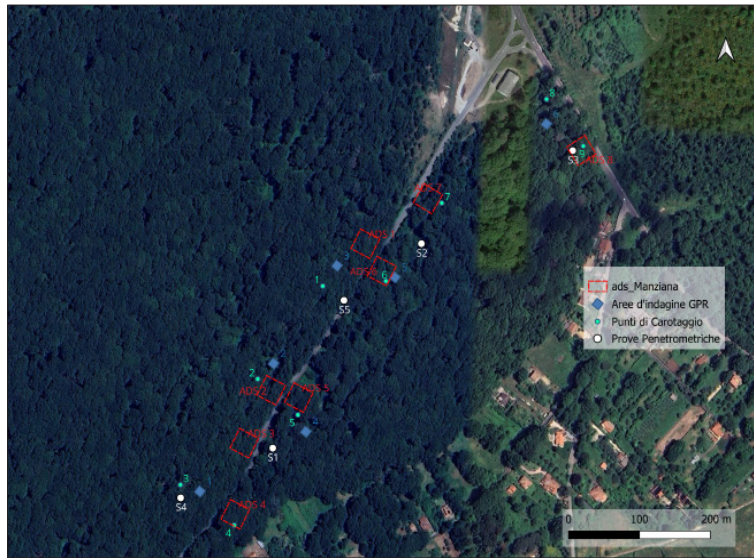


Figure 1 - The orthophoto highlights the location of the geognostic samplings (small circles), the DPSH tests (large circles), the GPR surveys (blue diamonds) and the dendrometric sample plots (red squares) in the study area.

question is located at an average elevation of 325 meters above sea level, nestled at the foot of a former river valley and is bordered by two shallow embankments that reach an altitude of 350 m a.s.l.. In the south-east the road is flanked by a ditch approximately one meter deep and 50–60 cm wide, where rainwater and surface runoff from the surrounding areas are channelled. On observing the Geological Map of Italy, sheet n. 143 “Bracciano” (1:100,000) (Moderni *et al.*, 1968), it is evident that the geological substrate is composed of an ignimbrite plateau (trachytic ignimbrites τ^w3) with local lava expansions and violent volcanic mud flows (lahar), characterized by large ignimbritic effusions connected to fissure systems, that surround the entire area of the Sabatini mountains. Locally, above the volcanic substrate floods of medium-recent age emerge, mostly characterized by eluvial deposits.

The strips of woodland are part of a forest called “Macchia Grande di Manziana”, a mixed mesophilic oak forest dominated by Turkey oaks (*Quercus cerris* L.) with Hungarian oaks (*Q. frainetto* Ten.) in the upper

canopy layer, by other broad-leaved trees such as white hornbeam (*Carpinus betulus* L.), field maple (*Acer campestre* L.) and black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) in the lower canopy layer, with a floristic composition of the undergrowth which makes it classified as *Quercetum frainetto-cerris* Oberd. 1948 em. Horvat 1959 association (Blasi, 1984). The wooded area falls within the Natura 2000 Special Conservation Area IT6030008 “Macchia di Manziana” and in the Special Protection Area IT6030005 “Distretto Tolfetano-Cerite-Manziate”.

The investigation took into consideration the strips of forest on the sides of the roads to a width of 30 m as it is from this area that trees can fall onto the roadway.

2.1 Previous studies into the propensity of trees to collapse

On three different days in August 2018, November 2019 and May 2020, some trees located in the study area were uprooted by strong winds and fell onto roads blocking them and narrowly missing some passing vehicles.

The landowner had been conducting annual VTA (Visual Tree Assessment) stability surveys since 2012. The investigation had led to the felling of 25 trees which showed clear signs of deterioration of the woody tissue at collar level, caused by lignicolous decay agents (Felicetti, 2018). Subsequently, several trees were windthrown due to root failure of the trees deemed healthy by the VTA analysis. After these events, in 2017 an investigation based on the ESP methodology (*Esame Speditivo Puntuale* - Expeditive Thorough Examination; "Sicuramente Alberi" work group, 2011) was carried out on the two forest strips. Only two trees growing along the SP 493 Braccianese-Claudia road were found in critical conditions due to the accentuated inclination of the trunk towards the road and wood decay so they had to be felled. No notable macroscopic alterations affecting the trees were observed along the SP 2c. However, some critical issues emerged from the analysis of the root systems of the windthrown trees, always caused by the overturning of the root plate whose dimensions appeared to be small in size compared to the size of the trees in several cases. In particular, the three Turkey oak trees with a 50 cm DBH that were felled during the extreme wind event on 20 August 2018 had average root diameter of approximately 1.50 m and an average rooting depth of between 0.50-0,70 m. The root system was also completely devoid of taproots and secondary roots, but was composed solely of superficial branched roots with an average diameter between 10-12 cm. However, a visual analysis on the tree trunk and crown did not show any clear evidence of mechanical stress caused by wind (Felicetti, 2018).

3. METHODS

3.1 *Geotechnical and geophysical investigations*

In order to determine the types and geotechnical properties of the soil in which the root systems of the trees growing along the road are situated, a geotechnical and geophysical campaign was carried out. As regards the lithological characterization, in October 2020 nine soil samples were taken using a rotary drill, which were then analyzed in the geotechnical laboratory (Figure 1). For geotechnical characterization five dynamic probing super-heavy tests (DPSH) were conducted during the same period. Six Georadar tests were carried out to monitor the stratigraphic trend in the subsurface and determine the location and depths of the roots. This latter type of investigation was carried out at the end of July 2022, therefore in the middle of summer since the low humidity in the first oversoil reduces the interference with the transmission of electromagnetic waves generated by the Georadar.

3.2 *Geognostic cores*

The geotechnical investigations were performed with a manual rotary probe using the core barrel method. The soil recovery rate varied depending on the soil type but consistently exceeded 80%. Even though these are predominantly granular soils, with the exception of the most altered sediments, the clayey matrix is the most commonly found (CNR-UNI 10006, 1963). The soils investigated were subjected to geotechnical laboratory analyses, in order to determine water content and grain size distribution (ASTM, 1972; Bruschi & Crippa, 2014). The tests were carried out in the Geology and Sedimentology Laboratory at Tuscia University.

3.3 Dynamic probe super heavy tests (DPSH)

Dynamic probe super heavy tests determine the resistance of soils. It involves vertically driving a standard cone-shaped metal tip attached to a steel rod into the ground, which can be extended by adding additional rods (Lunne *et al.*, 2002). The probe is inserted by driving a mallet weighing 63.5 kg into the ground from a set height of 0.75 m. The parameter measured is the resistance of soil to penetration, defined as the number of blows required to move the conical tip over a specified distance. In the reference procedure followed (Eurocode 7: Geotechnical design.” (Bond *et al.*, 2013), this length is 0.2 m. A *Menhir* 100 kN-DPSH penetrometer was used which was driven by the four-stroke engine, as described in Table 1. The tests were carried out near five of the nine core drilling points (Figure 1).

3.4 Ground penetrating radar (GPR) survey

Ground penetrating radar or G.P.R. (Ground Probing Radar) is a non-intrusive technique used in geophysics for studying the subsurface by transmitting various intensities of radar pulses into the ground (Stokes *et al.*, 2002). These pulses are emitted continuously by an antenna positioned on the ground undergoing investigation. When the electromagnetic pulse, which travels in depth, encounters a surface that separates two media with different dielectric characteristics, a part of the incident energy is reflected, and a part is refracted into the second medium. The reflected waves return to the surface and are detected by the radar’s receiving antenna, while the portion of transmitted energy transported beyond the discontinuity can produce other reflections on deeper discontinuities. The electromagnetic signal is repetitive with a predefined modulation. By selecting a reliable signal scan, as the equipment moves

Table 1 - Characteristics of the “MENHIR” penetrometer.

Mass of hammer	$M = 63.5 \text{ kg}$
Drop height	$H = 0.75 \text{ m}$
Static maintained load	$M_s = 30 \text{ kg}$
Size diameter cone	$D = 50.5 \text{ mm}$
Cone Area	$A = 20 \text{ cm}^2$
Cone tip angle	$\alpha = 90^\circ$
Length of the rods	$L_a = 1.0 \text{ m}$
Weight per metre	$M_a = 8.0 \text{ kg/m}$
Tip advancement	$\delta = 0.2 \text{ m}$
Specific energy	$E_s = MH/Ah = 11.91 \text{ kg/cm}^2$

incrementally along a predefined path on the surface, a two-dimensional representation is created which is called an electromagnetic section or “radargram” which shows the signal path reception time of the reflected signals that provide information on subsurface structures (Faize & Alsharahi, 2019). Six tests were conducted near the locations where the core drilling and penetrometric tests were carried out, as are shown in Figure 1.

3.5 Meteorological analyses

Rainfall and wind speeds in the study area were evaluated using meteorological data obtained from the Vigna di Valle weather station located to the east of the study area at an altitude of 270 m a.s.l. The weather station is located 8 km as the crow flies from the Macchia Grande di Manziana forest. This is the reference station for the Meteorological Service of the Italian Air Force and for the World Meteorology Organization, relating to the Lake Bracciano area. In order to carry out an in-depth climate change and spatio-temporal trend analysis, data for the period 2000-2019 were used.

3.6 Dendrometric analyses

In order to evaluate the tree and stand attributes of the two forested strips, eight sample plots were delimited, near eight of the nine lithostratigraphic sampling points (Figure 1). Five sample plots were positioned along the side of the SP 2c that faces South East (SE side) where the wooded strip is longer than the opposite side - the one towards the heart of Macchia Grande di Manziana (NW side) - and includes the sampling point that flanks the SP 93. The square sample plots were 30 m by 30 m with the side measure corresponding to the average height of the trees, estimated visually. One of the sides was located at the edge of the asphalt road. All of the sample plots were divided into three sub-areas (zone 1, 2 and 3) covering 300 m² each (30 m x 10 m) oriented to be parallel to the road, in order to be able to evaluate the height of the trees in relation to their distance from the road. And therefore to the possibility of them falling onto the roadway.

In each sample plot the diameter of each tree was measured at breast height (DBH), using a minimum DBH threshold of 22.5 cm. The diameter threshold was chosen considering the high number of trees smaller than it present along the tree belts, which was in any case counted to quantify their frequency. For a sample of 59 above-DBH-threshold trees (7-8 in each test area), the total height, the height of lowest green branches of the crown, crown width corresponding to the four cardinal directions and the trunk inclination angle were determined.

4. RESULTS

4.1 Geotechnical and geophysical investigations

– Grain size analyses

As observed in Table 2, the granulometric analysis determined that the topsoil is

mainly sandy but with local lens with a high clay content.

– DPSH tests

As shown in Table 3, layer 1 which for almost all the tests carried out goes from ground level to about one meter deep, presents completely inconsistent soils, so much so that beyond the first 20 cm the drill rod penetrated the soil only with the weight of the hammer resting on it. This implies very low geotechnical characteristics for this first layer, a situation that was repeated with slightly different thicknesses in all the penetrometric tests.

– Ground Penetrating Radar Survey

The purpose of performing radargrams is to detect single and/or multiple anomalies in the first subsurface along the paths taken. It was observed that the plano-altimetric arrangement of the roots stabilizes up to a depth of approximately one meter from ground level and it suggests that most of the roots are concentrated in this upper layer of soil.

For this investigation, an average value of the dielectric constant of the materials equal to 9 was used in relation to the grain size of the study area, which resulted in a radar pulse propagation speed of 0.10 m/ns. Using a 900 MHz antenna, it was possible to explore up to a maximum depth of 1.30 m from the ground level, while with a 400 MHz antenna we reached 2.00 m of depth.

The radar interpolation plans (time slices) clearly show (Fig. 2) the distribution of the root systems within the first meter of depth, highlighting their concentration in this superficial layer. Furthermore, they show the gradual increase in humidity starting from about 1.20 m of depth, highlighting how these data are crucial to understand the characteristics of the soil under examination.

Table 2 - Results of the grain size analysis.

SAMPLE	HUMIDITY	GRAVEL	SAND	SILT	CLAY	GRANULOMETRY
n.	%	%	%	%	%	
1	47.06	4.96	43.2	11.91	39.82	Clayey sand with slight silt
2	32.84	4.44	41.3	14.45	39.82	Clayey sand with slight silt
3	31.27	3.96	34.19	22.33	39.82	Clayey sand with slight silt
4	39.97	2.81	10.93	46.45	39.82	Clayey silt slightly sandy
5	21.54	3.16	12.32	44.69	39.82	Clayey silt slightly sandy
6	40.12	2.35	25.61	32.23	39.82	Sandy silty clay
7	26.46	17.19	18.32	24.66	39.82	Silty clay. slightly sandy-gravelly
8	31.27	26.31	46.65	18.47	7.52	Gravelly-silty sand
9	25.71	26.31	55.4	36.02	6.82	Gravelly-silty sand

Table 3 - Results of DPSH penetrometer tests.

LAYER NUMBER	LITHO-STRATIGRAPHIC UNIT	AVERAGE NUMBER OF HITS	THICKNESS (m)	AGI CLASSIFICATION
1	Topsoil	1	0.0-1.0	Not very consistent
2	Alteration of tuffaceous deposits	4.2	1.0-3.0	Not very consistent
3	Incoherent tuffaceous deposits	5.7	3.0-5.0	Not very thick
4	Semi-lithoid tuffaceous deposits	51	5.0-5.2	Very thick

4.2 Wind and rainfall patterns in the study area

The data collected from the Vigna di Valle weather station showed that in the Lake Bracciano area the average annual rainfall over the twenty-year period considered was equal to 843.1 ± 100.3 mm, however during the decade 2010-2019 the average annual rainfall was 24% higher than in the previous decade (932 versus 754 mm). Average rainfall regime is high but not particularly heavy and it is in line with the climatic characteristics of the volcanic anti-Apennine zone of Lazio whose rainiest season is autumn, followed by a secondary maximum in early spring and an attenuated summer drought. Approximately 70% of annual rainfall falls in the semester from October to March and 44% of annual precipitation falls in the October-December quarter alone.

Every year there were on average 6.4 days when wind gusts exceeded 75 km/h. It is important to note that half of the 14 weather events during which wind gusts reached speeds above 90 km/h occurred in the last 5 years of the study period (2015-2019) amounting to an average of 2.8 events per year. In the same five-year period there were 12 weather events with maximum windspeeds exceeding 120 km/h, including three events in which wind gusts exceeded 150 km/h. The days in which wind speeds exceed 75 km/h occur more frequently in the autumn-winter season in correspondence with precipitation peaks (Figure 3). However, weather events with very high winds over 90 km/h, have also occurred in midsummer.

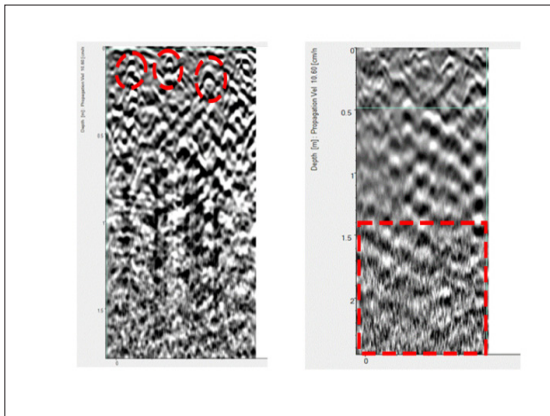


Figure 2 - Left: the Georadar scan with 400 MHz antenna: the root systems are indicated with red circles. Right: the scan with a 900 MHz antenna: an increase in soil humidity is highlighted in the red rectangle.

3.3 Dendrometric characterization of wooded areas

Tables 4 and 5 show the main dendrometric attributes of the investigated forest stand, which appear to be quite variable from point to point, especially in terms of tree density. As regards the size of the trees, the stand appears more homogeneous on the NW side.

On the SE side, the total density of trees is on average almost double compared to the NW side. The ratio is reversed if only trees with a diameter greater than 22.5 cm are considered, which are only 12% of the total on the SE side against 45% on the NW side. On the SE side, the lower density of trees significantly increases the value of the average diameter. The inverse ratio between tree density and average diameter leads to average values of basal area that are not very different from each other on the two sides. The exception is sampling plot 7 where trees with a diameter greater than 42 cm were completely absent.

Trees with dbh greater than 22,5 are mainly made up of oaks (86% on average considering the total of the sampling plots). On the SE side, the presence of Turkey oak and Hungarian oak is lower than average and

allows for a greater presence of other broad-leaf trees, in particular white hornbeam, field maple and black locust.

The average sizes of trees are high on both sides of the road. In all the sampling plots, individuals with more than 80 cm in diameter and more than 35 m in height were measured, except in no. 7.

The average distribution of diameter frequencies built with the class values detected in the eight sample plots highlights a very wide range of values and a tendency for the number of trees to decrease as the diameter increases; however, the trend is rather irregular with several peaks even in the largest classes (Figure 4). The diameter classes greater than 80 cm are located in zones 2 and 3, i.e. those further inside the road, between 10 and 30 meters from the roadside. Individuals with smaller diameters are mostly found within 10 meters from the roadside (zone 1) where, however, the sporadic presence of large trees (60-84 cm in diameter) is also recorded.

The vertical structure of the wooded strips is multi-layered on both sides of the road. This is demonstrated by the presence in all sampled points of a dense group of trees with a diameter of less than 22.5 cm (Table 4), which constitutes the lower layer of the stand, and by the wide range of heights measured in the sample plots as shown by the height-diameter curves. The graph in Figure 5 also shows the marked variability of the height values of the trees belonging to the diameter classes between 25 and 45 cm, on both sides of the road.

The site fertility is high, as demonstrated by the presence of trees that exceed 40 m (Figure 5), and by the comparison with the dominant height values of the oldest age classes reported on the yield table of the Turkey oaks stands of the Cimini Mountains (Paganucci, 1975) growing in ecological conditions very

Table 4 - Tree density and stand composition of the wooded strips, for the whole of the sample plots (SPs) and distinguished by side of the road.

	SAMPLE PLOT	TREES TOTAL	TREES dbh > 22.5 cm	TREES dbh < 22.5 cm		OAK TREES dbh > 22.5 cm	
	n°	n ha ⁻¹	n ha ⁻¹	n ha ⁻¹	%	n ha ⁻¹	%
All of the sample plots	1	500	267	233	46.7	244	91.7
	2	200	178	22	11.1	178	100.0
	3	756	211	544	72.1	189	89.5
	4	467	122	344	73.8	100	81.8
	5	644	122	522	81.0	78	63.6
	6	1133	100	1033	91.2	56	55.6
	7	1278	111	1167	91.3	100	90.0
	8	956	78	878	91.9	78	100.0
	Mean	742	149	593	80.0	128	86
	St. Dev.	363	64	401		67	
	CV (%)	49.0	43.2	67.7		52.6	
SPs 1-3 NW side	Mean	485	219	267	55.0	204	93
	St. Dev.	278	45	263		36	
	CV (%)	57	21	99		18	
SPs 4-8 SE side	Mean	896	107	789	88.1	82	78
	St. Dev.	337	19	346		19	
	CV (%)	37.6	17.4	43.9		22.6	

similar to those of Macchia Grande di Manziana. Fertility seems to be better in the SE side where the average height of the trees is higher and where the tallest trees were measured. This fact is to be related to the watershed conformation that characterizes the terrain along the SE side, which favors the accumulation of soil and water.

The mechanical stability of a tree, i.e. its ability to resist the forces that tend to make it overturn, can be synthetically evaluated through the height-diameter ratio (HDR). The critical threshold of this parameter, beyond which a tree is defined as being at high risk of being windthrown, is usually set in the literature at a value of 75-80 (La Marca, 2017; Wonn & O'Hara, 2001). It should

be remembered that, as already mentioned, other factors influence the fall of a tree due to the wind, so this is only an indicative threshold. The average value of the HDR of the stand along the examined strips of forest is not particularly high (Table 5). In the NW side it was higher but still below the critical threshold. Only in the test area n° 7 is this value reached as the stand is made up only of trees with a diameter between 25 and 40 cm. In fact, observing the trend of the HDR as a function of the diameter class, it can be seen that the average value decreases as the diameter increases (Figure 6). The highest values therefore occur in the classes between 25 and 50 cm where several individuals with HDR equal to or greater than 70 were sampled.

Table 5 - Stand attributes of the wooded strips, for the whole of the sample plots (SPs) and distinguished by side of the road.

	SAMPLE PLOT	BASAL AREA	MEAN DIAMETER	MEAN HEIGHT	HDR	STEM INCLINATION
	n.	m ² ha ⁻¹	cm	m		degree
All of the sample plots	1	33,4	41,7	30,2	72,4	7,5
	2	33,0	48,6	31,6	64,9	10,6
	3	38,1	50,7	31,9	63,0	8,8
	4	33,6	65,4	34,2	52,2	3,3
	5	40,5	81,4	36,1	44,3	5,7
	6	32,7	86,5	36,6	42,3	9,0
	7	10,4	36,4	29,0	79,7	6,4
	8	36,4	77,2	35,6	46,1	2,1
	Mean	32,3	61,0	33,1	58,1	6,7
	St. Dev.	9,3	19,2	2,9	13,9	2,9
CV (%)	28,7	31,5	8,7	24,0	43,2	
SPs 1-3 NW side	Mean	34,8	47,0	31,2	66,7	8,9
	St. Dev.	2,8	4,7	0,9	5,0	1,5
	CV (%)	8,1	10,0	2,9	7,5	17,2
SPs 4-8 SE side	Mean	30,7	69,4	34,3	52,9	5,3
	St. Dev.	11,8	20,0	3,1	15	2,7
	CV (%)	38,3	28,9	9,0	29,1	50,5

These are 17 trees, mostly located in the sample plots on the NW side, where the density of trees with a dbh greater than 22,5 cm is higher (Table 4), and in the innermost parts of the wooded strips (Zones 2 and 3) where the trees of the largest diameter classes are also concentrated (Fig. 4). The 17 trees in question have, therefore, grown in conditions of high competition for light. Their diameter is between 28 and 47 cm and they have a height that on average is greater than 32 m and in some cases exceeds 38 m (Table 6). Based on these dendrometric attributes, this is the category of trees most at risk of being windthrown and which, by virtue of their height and distance from the road, could, by falling, invade the carriageway. It

should be noted, however, that the dimensions of their crown are not disproportionate to the diameter of the stem and, therefore, appear in line with those of the trees belonging to larger diameter classes at least as average values. The tree height at which the green crown begins is in this sub-sample of 17 trees equal on average to just over half of their total height as occur for all the other trees whose crown was measured. The crowns of the sub-sample have a diameter that on average is 8.1 m but that increases linearly as the size of the stem increases, not differently from what happens considering all the trees measured in the sample plots (Figure 7). The largest crowns, capable of determining a strong sail effect, are, therefore, typical of the

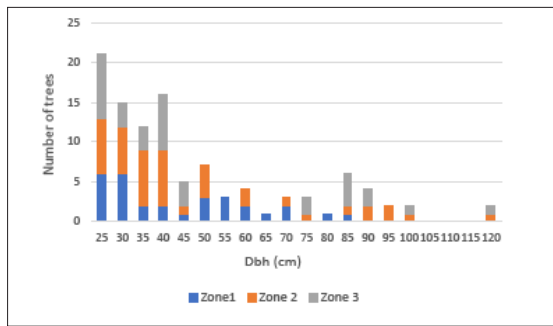


Figure 4 - Diameter class distribution of trees divided into sub-plots at increasing distances from the road edge (From Zone 1 to Zone 3).

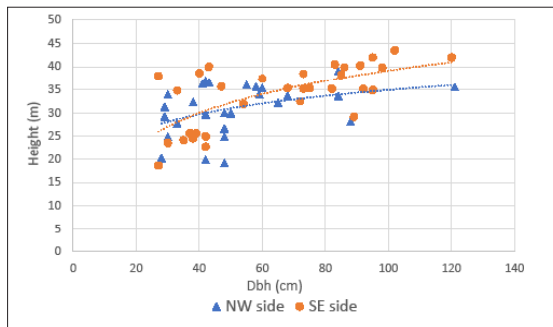


Figure 5 - Height-diameter correlation curves for the woodland strips on both sides of the roads crossing the forest of Macchia Grande di Manziana forest. Blue triangles: NW side; red circle: SE side.

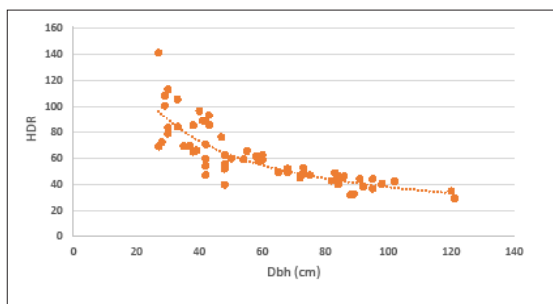


Figure 6 - Height-to-diameter ratio plotted against diameter at breast height.

trees with the largest diameters that also have the greatest heights and are therefore more exposed to the wind.

The crown diameter of trees with HDR greater than 70 is on average 22.9 times the

stem diameter, while that of the total of the measured trees is 21.6. Those values fall within the range of broadleaf trees that grow in closed forest stands (Hemery *et al.*, 2005). The value of the crown diameter to stem diameter ratio tends to decrease slowly as the diameter increases and is more variable in the diameter classes 30-45 cm where there are trees whose crown width is greater than 30 times the stem diameter and others where this value drops to 15.

Another parameter that can affect the propensity of a tree to collapse is the inclination of the stem but the sampling carried out did not highlight particularly critical situations (Table 5). Of the 59 trees on which this characteristic was detected, 35 were found to have a trunk inclination greater than 5°, always in the direction of the road. The average inclination is slightly less than 7°, with maximum values of 25° on 5 trees, all belonging to the sample plots on the NW side of the road (n° 1, 2 and 3). The stem inclination of the trees with HDR greater than 70 is, on average, slightly greater than that estimated for the entire population.

5. DISCUSSION

In the countryside west of Lake Bracciano where the study area is located, the days during which winds reached speeds close to or above 75 km/h, which is considered the threshold of a tree's resistance to windthrow even if it is in good condition, are not uncommon.

It should also be considered that the opening in the forest canopy caused by the construction of the road increases the possibility that the wind can create vortices within it, increasing the force of impact on the treetops.

As mentioned in the introductory section of this paper, the uprooting of a tree by wind

Table 6 - Location zone within the sample plots, and size of the 17 trees with HDR equal or greater than 70.

SAMPLE PLOT	SIDE	NUMBER OF TREES			Total	DIAMETER (cm)		HEIGHT (m)	
		Zone				min	max	min	max
		1	2	3					
1	NW	2		2	4	28	41	20,2	26,3
2	NW		3	1	4	30	42	24,9	37
3	N			3	3	29	43	29,2	36,6
4	SE	1	1		2	33	47	34,8	35,7
5	SE			2	2	40	43	38,6	40
6	SE			1	1	27		38	
7	SE		1		1	30		23,6	
8	SE				0	-	-	-	-
Total		3	5	9	17				

may be due to multiple factors. Firstly, the state of health of the tree may be the cause, in particular rot at the base of the stem or in the root system. However, in this case study the landowner succeeded in eliminating this issue by carrying out windthrow hazard assessments after the first windthrow events and careful monitoring activities and prevention work over the last ten years.

Particular attention in this study was given to the size and shape of the trees and to the structure of the forest stand along the strips, which can facilitate their fall under the pressure of the wind. Since these are portions of forest with a high tree density and not regular rows, the assessments of the risk of falling refer to the entire stand or to size categories of trees grown within it, and not to individual subjects.

The wooded strips considered in this study have a variable stand structure with a multi-layered vertical profile, as already found in a previous research (Agrimi *et al.*,

1991). The size of trees, and in particular their height, crown extension and height-diameter ratio which most influence the possibility of them falling due to the wind, are highly variable.

The group of trees that has been most deeply analyzed are those with diameters greater than 22.5 cm up to over 120 cm. The trees that form the upper layer of the forest, with heights between 30 and 40 m, are located in this diameter range. These are the most

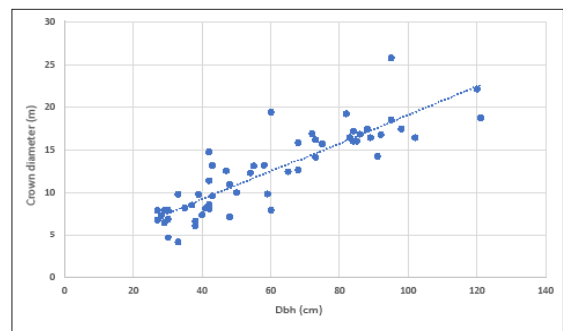


Figure 7 - Relationship between crown diameter and diameter at breast height.

vulnerable trees from a tree-stability perspective because their crowns are directly exposed to the force of the wind, especially when they are located in Zone 1 of the strips, i.e. the strip nearest the roadway. Some of these have an HDR value higher than the critical threshold of 70 even though they do not belong to the larger diameter classes, while there are trees with a diameter greater than 80 cm with a more balanced height-diameter ratio. However, the latter group of trees, due to the great height and crown width, are strongly exposed to the force of the wind.

Tree overturning resistance also depends on the soil conditions and root bonding properties anchoring the tree to the ground. The results obtained in this study have highlighted how the forest soil along the wooded strips is deep enough but exhibits poor geotechnical characteristics especially in the first metre below ground level where the majority of root systems are located. The low degree of soil compaction is accentuated by the high level of imbibition caused by rainwater. Annual average precipitation in the area around Lake Bracciano is abundant, however it is concentrated in the autumn-winter season and in early spring. During this period, the evapotranspiration of trees belonging to deciduous species, which removes water from the soil via evaporation or transpiration, is at minimum levels while there is a high probability of strong wind events occurring. The high imbibition of the soil can lead to asphyxia in the deeper layers which inhibit the in-depth development of the root system as highlighted by the Geo-Radar survey confirming the observations made on the root systems of trees felled by the wind (Felicetti, 2018). The low degree of soil compaction makes the stability of even large trees precarious, even though, as already mentioned, they have HDR values lower than the critical threshold.

6. CONCLUSIONS

The frequency of heavy windstorms appears to be increasing in recent years in Europe due to climate change and consequently the danger of falling trees in urban and peri-urban areas will increase (Portoghesi *et al.*, 2023).

Along the forest strips examined in this study, the risk of trees falling due to strong winds is already high. The stand structure and tree characteristics exacerbate their instability however the risk of windthrow is significantly accentuated by the geotechnical and geophysical characteristics of the geopedological substrate and by the high soil water content during the autumn-winter season.

Ultimately, the trees analyzed are a bit like giants with feet of clay, whose behavior in the event of a windstorm is not individually predictable, depending on the state of the various predisposing factors at the time of the event.

How, then, the risk that trees may fall on days of bad weather and cause damage to people and vehicles, given the high intensity of traffic on the stretches of road that flank the wooded areas, can be reduced? Considering what has emerged from this study, only two lines of management of the wooded strips seem possible:

1. Elimination of risk with a multi-decade time horizon. This solution would involve the felling of all trees with diameter larger than 22.5 cm on both sides of the roadway up to a width of 30 m. During felling, maximum attention should be paid to releasing a sufficiently large contingent of individuals with a diameter of less than 22.5 cm, which would facilitate the recovery of the stand towards a forest still dominated by oak species. It would also require silvicultural tendings over time aimed at encouraging the reaffirmation of Turkey oak and

Hungarian oak and the control of currently accessory species, in particular those of an invasive nature such as black locust. This would be an extreme solution, with a strong impact on habitat conservation and landscape, also taking into account that the tree belts in question constitute a portion of the SCZ IT6030008 “Macchia di Manziana”.

2. Risk management with a short-term time horizon. This choice would involve cutting down only trees with HDR equal to or greater than 70, taking care not to leave too large spaces between the crowns of the released trees, within which the strong wind could create dangerous vortices for the stability of the plants left standing. Large trees would be respected, but they would remain unstable due to the characteristics of the soil, especially in periods of heavy rainfall and imbibition of the substrate. Silvicultural action should be accompanied by frequent monitoring of the phytosanitary conditions of the trees. This solution alone would not be able to guarantee the full safety of those travelling along the road in the presence of strong winds and would require careful management of the residual risks and would entail restricting access to the sections of road flanked by trees. The following actions would be required: i) clear hazard warning signs to alert travellers of the risks they may encounter on critical sections of road in moderate winds (40-50 km/h); ii) the implementation of an early warning system based on short-range weather forecasts which enables the timely closure of the road on days on which the probability of *wind gusts in excess of 90 km/h* occurring is particularly high. It is clear that this solution would be particularly difficult for the landowner, who is le-

gally *responsible* for any damage inflicted by a *tree falling on his/her property*.

Data collected by the weather station recently installed near the wooded areas will provide in the medium term more accurate knowledge of the local microclimate especially with regard to the frequency and intensity of windstorms.

However it would be advisable, when implementing the next Forest Management Plan for Macchia Grande di Manziana, to create a special management unit, separate from the rest of the forest, which includes the wooded strips considered in this study in order to plan management actions aimed at best ensuring the stability of the trees.

The windthrow of trees overhanging very busy roads is a disservice that reduces the social and environmental benefits of peri-urban woodlands. An increase in extreme weather events including windstorms could significantly increase the probability of wind hazards occurring. Only a multidisciplinary approach that carefully considers the various factors that can cause a tree to topple over can help us make effective evidence-based management decisions that effectively prevent serious accidents and injuries.

REFERENCES

- Agrimi M., Ciancio O., Portoghesi L., Pozzoli R., 1991 - *I querceti di cerro e farnetto di Macchia Grande di Manziana: struttura, trattamento e gestione*. Cellulosa e Carta, 5: 25-49.
- Antonescu B., Schultz D.M., Holzer A., Groenemeijer P., 2017 - *Tornadoes in Europe: An underestimated threat*. Bull. Am. Meteorol. Soc., 98: 713-728; <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0171.1>
- ASTM, 1972 - *Test designation D422. Standard Method for Particle size Analysis of Soils*. ASTM Philadelphia, USA.

- Battisti C., Poeta G., Fanelli G., 2016 - *An Introduction to Disturbance Ecology*. Springer Cham, 178 p.; <https://doi.org/10.1007/978-3-319-32476-0>
- Blasi C., 1984 - *Two examples of the use of numerical classification and ordination methods in the analysis of structure and chorology of vegetation types*. *Studia Geobotanica*, 4: 129-1:15.
- Bond A.J., Schuppener B., Scaroelli G., Orr T.L.L., 2013 - *Eurocode 7: Geotechnical Design. Worked examples*. Report EUR 26227 EN. Joint Research Centre.
- Bruschi A., Crippa, F., 2014 - *Prove geotecniche di laboratorio: Guida pratica per la soluzione delle problematiche interpretative e di previsione geotecnica*. Dario Flaccovio Editore.
- Canessa A., 2019 - *Il Ciclone "Adrian". Una delle peggiori tempeste che abbia mai colpito l'Italia*. *Rivista di Meteorologia Aeronautica*, 3: 5-21.
- Cavicchia L., Von Storch H., Gualdi S., 2014 - *Mediterranean tropical-like cyclones in present and future climate*. *J. Clim.*, 27: 7493-7501; <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00339.1>
- CNR-UNI 10006, 1963 - *Costruzione e manutenzione delle strade. Tecnica di impiego delle terre*.
- Cullen S., 2002 - *Trees and Wind: Wind Scales and Speeds*. *Arboric. Urban For.*, 28: 237-242; <https://doi.org/10.48044/jauf.2002.036>.
- De Rita D., Di Filippo M., Rosa C., 1996 - *Structural evolution of the Bracciano volcano-tectonic depression, Sabatini Volcanic District, Italy*. Geological Society, London, Special Publications, 110 (1): 225-236; <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1996.110.01.17>
- Faize A., Alsharahi G., 2020 - *Preliminary study of roots by georadar system*. In *Embedded Systems and Artificial Intelligence: Proceedings of ESAI 2019*, Fez, Morocco. Springer Singapore, p. 173-182.; https://doi.org/10.1007/978-981-15-0947-6_17
- Felicetti M., 2018 - *Analisi visiva speditiva su alberature ubicate nelle fasce boscate ai lati di Via Lazio e Via Braccianese-Claudia. Relazione tecnica*. Università Agraria di Manziana, Comune di Manziana, Città Metropolitana di Roma.
- Groenemeijer P., Púćik T., Holzer A.M., Antonescu B., Riemann-Campe K., Schultz D.M. et al., 2017 - *Severe convective storms in Europe: Ten years of research and education at the European Severe Storms Laboratory*. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 98: 26412651; <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0067.1>
- Gruppo di lavoro "Sicuramente alberi", 2011 - *Procedure per la gestione del rischio da caduta alberi nelle aree Verdi estensive*.
- Hemery G.E., Savill P.S., Pryor S.N., 2005 - *Applications of the crown diameter-stem diameter relationship for different species of broadleaved trees*. *For. Eco. Man.*, 215: 285-294; <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.05.016>
- Johnson E.A., Miyanishi K., 2021 - *Disturbance and succession*. In *Plant Disturbance Ecology: The Process and the Response*. Academic Press, p. 1-15; <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818813-2.00001-0>.
- La Marca O., 2017 - *Elementi di Dendrometria*. Patron Editore, 530 p.
- Linhares C.S.F., Gonçalves R., Martins L.M., Knapic S., 2021 - *Structural stability of urban trees using visual and instrumental techniques: A review*. *Forests*, 12; <https://doi.org/10.3390/f12121752>.
- Lunne T., Powell J.J., Robertson, P.K., 2002 - *Cone penetration testing in geotechnical practice*. CRC Press; <https://doi.org/10.1201/9781482295047>
- Moderni P., Perrone E., Zezi P., 1968 - *Carta Geologica d'Italia, scala 1: 100.000, Foglio n. 143 Bracciano*.
- Paganucci L., 1975 - *Ricerche dendrometriche e alsometriche sulle cerrete dei Monti Cimini (Viterbo)*. *L'Italia Forestale e Montana*, 30 (1): 1-17.
- Pipinato A., 2018 - *Recent northeast italian tornado events: Lesson learned for improving structures*. *Nat. Hazards*; <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3380-2>.
- Pokorny J.D., 1992 - *Urban Tree Risk Management: A Community Guide to Program Design and Implementation*. USDA For. Serv. Northeast. Area St, Paul, MN, 1-106.
- Portoghesi L., Masini E., Tomao A., Agrimi M., 2023 - *Could climate change and urban growth make Europeans regard urban trees as an additional source of danger?* *Frontiers in Forests and Global Change*, 6; <https://doi.org/doi 10.3389/ffgc.2023.1155016>
- Roman L., Tenley M., Eusenman T., Koeser A., Ordóñez Barona C., Locke D., Jenneret D., Östberg J., Vogt J., 2020 - *Beyond "trees are good": Disservices, management costs, and tradeoffs in urban forestry*. *Ambio*, 50: 615-630; <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01396-8>
- Sani L., 2017 - *Statica delle strutture arboree per la valutazione della stabilità*. Gifor, 943 p.
- Shackleton C.M., Ruwanza S., Sinasson Sanni G.K., Bennet S., De Lacy P., Modipa R., Mtati N.,

- Sachikonye M., Thondhlana G., - 2016 - *Unpacking Pandora's Box: Understanding and Categorising Ecosystem Disservices for Environmental Management and Human Wellbeing*. *Ecosystems*, 19: 587-600; <https://doi.org/10.1007/s10021-015-9952-z>
- Spinoni J., Formetta G., Mentaschi L., Forzieri G., Feyen L., 2020 - *Global warming and windstorm impact in the EU*; <https://doi.org/10.2760/039014>
- Stokes A., Fourcaud T., Hruska J., Cermak J., Nadyezhdina N., Nadyezhdin V., Praus L., 2002 - *An evaluation of different methods to investigate root system architecture of urban trees in situ: I. Ground-penetrating radar*. *Journal of Arboriculture*, 28 (1): 2-10; <https://doi.org/10.48044/jauf.2002.001>
- Virot E., Ponomarenko A., Dehandschoewercker È., Quéré D., Clanet C., 2016 - *Critical wind speed at which trees break*. *Physical Review, E* 93 (2); <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.93.023001>
- Wonn H.T., O'Hara K.L., 2001 - *Height: Diameter ratios and Stability Relationships for four Northern Rocky Mountains Tree Species*. *Western Journal of Applied Forestry*, 16 (2): 87-94; <https://doi.org/10.1093/wjaf/16.2.87>



Caduta di alberi da fasce boscate lungo infrastrutture viarie periurbane: un approccio multidisciplinare per l'analisi delle cause predisponenti e dei fattori scatenanti¹

Luigi Portoghesi ^{(a)(*)} - Federico Valerio Moresi ^(a) - Emanuela Masini ^(a) - Antonio Tomao ^(b)
Mariagrazia Agrimi ^(a)

¹ Ricerca finanziata dal Progetto di Interesse Nazionale EUFORICC - Establishing Urban Forest Based Solutions in Changing Cities (PRIN 20173RRN2S).

^(a) Dipartimento per la Innovazione nei sistemi Biologici Agroalimentari e Forestali - DIBAF, Università degli Studi della Tuscia; Via S. Camillo de Lellis snc - 01100 Viterbo.

^(b) Dipartimento di Scienze agroalimentari, ambientali e animali - Di4A, Università degli Studi di Udine; via delle Scienze 206 - 33100 Udine.

^(*) Autore corrispondente; lporto@unitus.it

Riassunto: La caduta di uno o più alberi in bosco è un fenomeno ordinariamente riconducibile alla dinamica naturale dell'ecosistema e accettato come tale. Quando fatti di questo genere si verificano in ambito urbano o lungo fasce boscate rasenti strade periurbane molto frequentate, il fenomeno viene percepito come un evento traumatico per le possibili conseguenze negative a danno di persone e cose e relative implicazioni di carattere legale. In questo caso si configura un disservizio ecosistemico che necessita di un'accurata attività di prevenzione. Diversi fattori, spesso concomitanti, possono determinare la caduta di un albero. L'articolo riporta i principali risultati delle indagini multidisciplinari svolte nell'ambito di un caso di studio riguardante le fasce boscate lungo alcuni tratti di una strada provinciale molto trafficata. Attraverso analisi di dati meteorologici e l'interpretazione di rilievi geotecnici, geofisici e dendrometrici sono state tratte alcune conclusioni sulle cause della caduta degli alberi, indicando alcune linee di gestione delle fasce boscate per la prevenzione della caduta degli alberi sulla strada.

Parole chiave: schianti di alberi in ambito urbano e periurbano; tempeste di vento; disservizi ecosistemici; analisi di fattori predisponenti e scatenanti; approccio multidisciplinare.

Citazione: Portoghesi L., Moresi F.V., Masini E., Tomao A., Agrimi M., 2024 - *Caduta di alberi da fasce boscate lungo infrastrutture viarie periurbane: un approccio multidisciplinare per l'analisi delle cause predisponenti e dei fattori scatenanti*. L'Italia Forestale e Montana, 79 (2): 59-75; <https://dx.doi.org/10.36253/ifm-1129>

Ricevuto 18/04/2024 **Versione rivista:** 27/06/2024 **Pubblicato online:** 26/07/2024

1. INTRODUZIONE

La caduta di uno o più alberi in foresta per cause abiotiche o biotiche fa parte della dina-

mica naturale dell'ecosistema così come le retroazioni con le quali quest'ultimo reagisce al fine di non perdere la sua integrità (Johnson e Miyanishi, 2021; Battisti *et al.*, 2016).

Al contrario, la caduta di alberi facenti parte di fasce boscate poste ai lati di strade intensamente trafficate, in ambito urbano o periurbano, si può tradurre in eventi traumatici che non dovrebbero accadere per i gravi danni a persone e cose che ne possono derivare. Si tratta di fatti che vengono percepiti dal pubblico come molto negativi per il proprio benessere e sicurezza, e dunque rientrano nella categoria dei disservizi ecosistemici collegati agli alberi situati in contesti urbani e periurbani (Shackleton *et al.*, 2016; Roman *et al.*, 2020).

La probabilità che un albero cada è particolarmente alta in caso di forti tempeste di vento. Questo tipo di fenomeni meteorologici estremi è in aumento in Europa, sia in termini di intensità che di frequenza (Antonescu *et al.*, 2017; Groenemeijer *et al.*, 2017) e la situazione potrebbe aggravarsi come conseguenza del cambiamento climatico (Cavicchia *et al.*, 2014; Spinoni *et al.*, 2020). In Italia, in particolare, il fenomeno degli eventi ventosi estremi è molto significativo, essendo il primo paese in Europa per danni alle proprietà e al secondo posto per morti e feriti conseguenti al verificarsi di tornado (Antonescu, 2017; Pipinato, 2018; Canessa, 2019).

Di norma, qualsiasi albero può essere abbattuto se le raffiche di vento che lo colpiscono oltrepassano la velocità di 90-100 km/h (circa 30 m/s; Cullen, 2002; Virost *et al.*, 2016). Se viene superata la resistenza opposta dal fusto, l'albero si spezza; se invece è il sistema apparato radicale-suolo a cedere, l'albero si schianta a causa del ribaltamento della zolla. Il fatto che un albero possa resistere anche a venti molto più forti o cadere già prima che il vento raggiunga la suddetta soglia di intensità, dipende dai diversi fattori che condizionano la resistenza meccanica del fusto e della chioma, e l'ancoraggio al suolo delle radici. Essi riguardano sia le caratteristiche topografiche, climatiche e pedologiche della stazione, sia gli attributi den-

drometrici e lo stato di salute dell'albero e/o del popolamento all'interno del quale esso cresce.

Tutti questi fattori vanno attentamente analizzati per una corretta valutazione temporale del livello di pericolo che l'albero può rappresentare e del rischio collegato alla sua caduta in relazione all'intensità di presenza di obiettivi sensibili. Solo in questo modo è possibile ridurre i danni da vento attraverso opportune scelte di gestione di singoli alberi o fasce di soprassuoli forestali che si trovano a diretto contatto con edifici o tratti di viabilità urbana e periurbana (Pokorny, 1992; Sani, 2017; Linhares *et al.*, 2021).

L'articolo illustra l'approccio multidisciplinare utilizzato in un caso di studio relativo alle fasce di bosco che fiancheggiano due tratti di strada periurbana intensamente percorsa da veicoli. Negli ultimi anni, in occasione di tempeste di vento, alcuni alberi sono caduti sulla sede stradale bloccando il traffico e coinvolgendo direttamente alcune automobili in transito. Le indagini inizialmente promosse dall'ente proprietario del bosco hanno escluso che le piante cadute fossero affette da alterazioni del legno a carico del fusto o dell'apparato radicale. Per questo sono stati, successivamente, indagati altri fattori ritenuti in grado di influenzare la stabilità degli alberi lungo le fasce di bosco, come le condizioni climatiche della stazione, la morfologia del terreno e i caratteri fisici del suolo nonché la struttura del popolamento forestale. La ricerca ha perseguito lo scopo di migliorare la comprensione delle cause che hanno determinato il crollo degli alberi e definire misure di gestione delle fasce boscate per prevenire il riproporsi di situazioni rischiose per la pubblica incolumità in caso di tempeste di vento.

2. AREA DI STUDIO

L'area di studio è sita nel Comune di Manziana (RM) ed è costituita dalle fasce di bo-



Figura 1 - Ortofotografia dell'area di studio con la localizzazione dei punti di campionamento delle diverse indagini svolte.

sco che costeggiano per circa 1,5 km i due lati della strada provinciale SP 2c, a partire dal bivio con la strada provinciale SP 493 Braccianese-Claudia, e da un breve tratto della stessa SP 493 in direzione del comune di Bracciano (Figura 1). Entrambi i tratti stradali sono caratterizzati da traffico veicolare molto intenso.

Il substrato geologico nell'area di studio è rappresentato dall'Apparato Vulcanico Sabatino (De Rita *et al.*, 1996). L'andamento geo-morfologico è piuttosto dolce; i rilievi collinari non raggiungono localmente quote elevate e sono intervallati da valli torrentizie. In particolare, il tratto in questione della SP 2c si trova ad una altitudine media di 325 m s.l.m., alla base di una ex valle fluviale, ed è bordato da due blandi rilievi che raggiungono la quota di 350 m s.l.m. Sul lato verso sud-est, la strada è fiancheggiata da un impluvio profondo circa un metro e largo 50-60 cm, dove si incanalano le acque meteoriche e i deflussi superficiali provenienti dal limitrofo rilievo. Dall'estratto della Carta Geologica d'Italia - Foglio 143 "Bracciano" (1:100.000) (Moderni *et al.*, 1968), si evince che il substrato geologico è costituito da un plateau ignimbrico - Ignimbriti trachiti-

che (τ^w3) con locali espansioni laviche ed estese colate di fango (lahar) -, caratterizzato da grandi effusioni ignimbriche connesse ad apparati fessurali che circondano tutta l'area del complesso Sabatino. Localmente, al di sopra del substrato vulcanico, affiorano alluvioni di età medio-recente, per lo più caratterizzate da depositi eluviali terrosi.

Le fasce di soprassuolo studiate appartengono al bosco di Macchia Grande di Manziana e sono costituite da un querceto misto mesofilo dominato dal cerro (*Quercus cerris* L.) con la presenza del farnetto (*Q. frainetto* Ten.) nello strato superiore e da altre latifoglie come carpino bianco (*Carpinus betulus* L.) e acero campestre (*Acer campestre* L.) in quello inferiore. È presente la robinia (*Robinia pseudoacacia* L.) come specie invasiva. Il sottobosco è formato da specie a baricentro balcanico (associazione *Quercetum frainetto-cerris* Oberd. 1948 em. Horvat 1959; Blasi, 1984). L'area boscata ricade all'interno del ZSC IT6030008 "Macchia di Manziana" e nella ZPS IT6030005 "Comprensorio Tolfetano-Cerite-Manziate".

Le indagini svolte hanno preso in considerazione le fasce di bosco interessate dagli

schianti, per una profondità di 30 m su entrambi i lati della strada.

2.1 *Indagini pregresse sulla propensione al cedimento degli alberi*

In tre diverse giornate, nell'agosto 2018, nel novembre 2019 e nel maggio 2020, alcuni alberi delle fasce boscate in questione sono stati sradicati dal forte vento e sono caduti sulla sede stradale bloccando il traffico e coinvolgendo direttamente alcuni autoveicoli in transito.

Schianti di alberi nelle stesse fasce boscate si erano già verificati in precedenza e l'ente proprietario di Macchia Grande, l'Università Agraria di Manziana, già a partire dal 2012, aveva fatto effettuare verifiche annuali di stabilità mediante il metodo VTA (*Visual Tree Assessment*). Le indagini svolte avevano portato all'abbattimento di 25 alberi che presentavano evidenti segni di degradazione del tessuto legnoso al livello del colletto, causata da agenti di carie lignicola (Felicetti, 2018). Successivamente, si erano verificati schianti per ribaltamento dell'apparato radicale di alberi risultati sani all'analisi VTA. Dopo tali eventi, nel 2017, lungo le due fasce boscate interessate dalle cadute di alberi, per una larghezza pari a 30 m, è stata eseguita un'indagine basata sulla metodologia ESP (Esame Speditivo Puntuale; Gruppo di lavoro "Sicuramente Alberi", 2011). Solo due alberi situati lungo la SP Braccianese-Claudia avevano evidenziato condizioni critiche dovute al deperimento, all'accentuata inclinazione del fusto in direzione della strada e alla presenza di porzioni di tessuto legnoso cariato, e ne era stato disposto l'abbattimento. Lungo la SP 2c l'indagine non aveva evidenziato criticità macroscopiche di rilievo a carico degli alberi. Alcuni aspetti critici sono, invece, emersi dall'analisi degli apparati radicali degli alberi schiantatisi nelle diverse occasioni, sempre per ribal-

tamento della zolla radicale che è risultata in diversi individui essere di limitate dimensioni per piante di quella grandezza. Ad esempio, i tre alberi di cerro con diametro nella classe di 50 cm caduti in occasione dell'evento del 20 agosto 2018 avevano apparati radicali con un diametro medio di circa 1,50 m e una profondità media non superiore a 0,50-0,70 m; l'apparato radicale risultava inoltre completamente privo di radici fittonanti e di secondo ordine, ma costituito unicamente da radici ramificate superficiali con un diametro medio non superiore ai 10-12 cm. Anche questi soggetti non mostravano, all'analisi visiva sul tronco e sulla chioma, segni che evidenziasse punti di debolezza alle sollecitazioni meccaniche causate dal vento (Felicetti, 2018).

3. MATERIALI E METODI

3.1 *Indagini geotecniche e geofisiche*

Per rilevare la tipologia e le caratteristiche geotecniche dei suoli dove sono localizzati gli apparati radicali delle piante poste al bordo della carreggiata, è stata effettuata una campagna di indagini geotecniche e geofisiche. Per la caratterizzazione litologica, nell'ottobre 2020 sono stati prelevati nove campioni di terreno tramite trivella a rotazione, successivamente analizzati in laboratorio, mentre per la definizione geotecnica, sempre nello stesso periodo, sono state eseguite cinque prove penetrometriche dinamiche superpesanti (DPSH). Per monitorare l'andamento stratigrafico in modo areale e verificare le profondità di localizzazione delle radici sono stati eseguiti sei saggi tramite strumentazione geofisica Georadar (Figura 1). Questo tipo di indagine è stata svolta alla fine di luglio del 2022, quindi in piena estate, per evitare l'elevata presenza di umidità nel primo sovra-suolo che interferisce con la trasmissione delle onde elettromagnetiche.

3.2 Carotaggi geognostici

I sondaggi geotecnici sono stati eseguiti con sonda a rotazione a completo funzionamento manuale con il metodo aste e carotiere. La percentuale di recupero è stata variabile in funzione della tipologia di terreno ma quasi sempre maggiore all'80%. Pur trattandosi di terreni a comportamento prevalentemente granulare, fatta eccezione per i sedimenti più alterati, la matrice argillosa è maggiormente presente (CNR-UNI 10006, 1963). I terreni coinvolti nei sondaggi sono stati sottoposti a prove geotecniche di laboratorio, nella fattispecie la determinazione del contenuto di acqua e la distribuzione granulometrica (ASTM, 1972; Bruschi e Crippa, 2014). Le prove sono state realizzate nel Laboratorio di Geologia e sedimentologia dell'Università degli Studi della Toscana.

3.3 Prove penetrometriche superpesanti (DPSH)

La prova penetrometrica dinamica è una metodologia per la determinazione della resistenza dei terreni; essa consiste nell'infingere verticalmente una punta metallica conica di dimensioni standard posta all'estremità di un'asta di acciaio prolungabile con l'aggiunta di successive aste (Lunne *et al.*, 2002). L'infissione avviene per battitura, facendo cadere da un'altezza costante di 0,75 m un maglio del peso di 63,5 kg. Il parametro misurato è la resistenza alla penetrazione, definita come il numero di colpi necessario ad infingere la punta conica per un tratto di lunghezza determinata. Nella procedura di riferimento seguita (Eurocode 7: Geotechnical design, Bond *et al.*, 2013) tale lunghezza risulta essere di 0,2 m. Il penetrometro usato è denominato "MENHIR", è azionato da motore a quattro tempi ed ha le caratteristiche riportate in Tabella 1. Le prove sono state eseguite in prossimità di cinque dei nove punti di carotaggio (Figura 1).

Tabella 1 - Caratteristiche tecniche del penetrometro "MENHIR".

Peso della massa battente	$M = 63,5 \text{ kg}$
Altezza di caduta libera	$H = 0,75 \text{ m}$
Peso del sistema di battuta	$M_s = 30 \text{ kg}$
Diametro della punta conica	$D = 50,5 \text{ mm}$
Area di base della punta conica	$A = 20 \text{ cm}^2$
Angolo apertura punta	$\alpha = 90^\circ$
Lunghezza delle aste	$L_a = 1,0 \text{ m}$
Peso per metro	$M_a = 8,0 \text{ kg/m}$
Avanzamento punta	$\delta = 0,2 \text{ m}$
Energia specifica	$E_s = MH/Ah = 11,91 \text{ kg/cm}^2$

3.4 Indagine Georadar (GPR)

Il georadar o GPR (*Ground Probing Radar*) è una strumentazione non invasiva, utilizzata in geofisica nello studio del primo sottosuolo, che si basa sull'analisi delle riflessioni di onde elettromagnetiche trasmesse nel terreno (Stokes *et al.*, 2002). Il suo uso comporta l'immissione nel terreno di impulsi elettromagnetici a frequenza variabile, ripetuti con continuità ed emessi da un'antenna posizionata sulla superficie da indagare. Quando l'impulso elettromagnetico, che si estende in profondità, incontra una superficie che separa due mezzi aventi caratteristiche dielettriche diverse, una parte dell'energia incidente viene riflessa ed una parte avanza nel secondo mezzo. Le onde riflesse ritornano in superficie e vengono rilevate dall'antenna ricevente, mentre la parte di energia trasmessa che procede oltre la discontinuità può produrre altre riflessioni su discontinuità più profonde. Il segnale elettromagnetico

viene ripetuto con una modulazione prefissata: scelta una scansione di segnale idonea, se la strumentazione viene fatta muovere progressivamente in superficie lungo un tracciato pre-determinato, si ottiene una rappresentazione bidimensionale, o sezione elettromagnetica, o “radargramma”, del tipo *spostamento lungo il tracciato/tempo di ricezione dei segnali riflessi* (Faize e Alsharahi, 2020). Sono stati eseguiti sei saggi in prossimità di punti dove sono stati realizzati i carotaggi e le prove penetrometriche, ubicati come rappresentato in Figura 1.

3.5 *Analisi meteorologiche*

Per le analisi relative alla piovosità e ventosità dell'area di studio sono stati utilizzati i dati meteorologici registrati dalla stazione di Vigna di Valle, nel Comune di Bracciano (Roma), posta a una quota di 270 metri s.l.m., a una distanza di circa 8 km in linea d'aria dal bosco di Macchia Grande di Manziana. Si tratta della stazione di riferimento per il Servizio Meteorologico dell'Aeronautica Militare e per l'Organizzazione Mondiale della Meteorologia, relativamente all'area del Lago di Bracciano. Per l'approfondimento delle tendenze climatiche sono stati considerati i dati del ventennio 2000-2019.

3.6 *Analisi dendrometriche*

Per valutare le caratteristiche dendrometriche degli alberi delle due fasce boscate lungo la strada, sono state delimitate otto aree di saggio, posizionate in prossimità di otto dei nove punti di campionamento litostratigrafico (Figura 1). Cinque aree di saggio sono state posizionate lungo il lato della SP 2c che guarda a Sud Est (Lato SE) dove la fascia boscata è più estesa in lunghezza rispetto al lato opposto - quello verso il cuore del Bosco di Macchia Grande (lato NO) - e include il punto di campionamento che fiancheggia la SP 93. Alle aree di saggio è stata data forma quadrata con lato di 30 m, corrispondente all'altezza media degli alberi, stimata

a vista. Uno dei lati è stato posto in corrispondenza del limite della strada asfaltata. La superficie delle aree di saggio è stata suddivisa in tre zone di 300 m² ognuna (30 m x 10 m) orientate in direzione parallela alla strada, in modo da poter valutare le dimensioni degli alberi anche in relazione alla loro distanza dalla carrozzabile.

In ogni area di saggio è stato misurato il diametro degli alberi a 1,30 m da terra, utilizzando una soglia minima di cavallettamento di 22,5 cm. La soglia diametrica è stata scelta considerando l'elevato numero di alberi di dimensioni ad essa inferiori presenti lungo le fasce arboree, che è stato comunque contato per quantificarne la frequenza.

Di un campione di 59 alberi con diametro superiore alla soglia di cavallettamento (7-8 in ogni area di saggio, distribuiti nelle classi diametriche maggiormente presenti) sono stati anche misurati l'altezza totale, l'altezza di inserzione della chioma, l'estensione della chioma lungo quattro direzioni corrispondenti ai quattro punti cardinali e l'inclinazione del fusto.

4. RISULTATI

4.1 *Indagini geotecniche e geofisiche*

- Analisi granulometriche

Dall'analisi granulometrica, come visibile nella Tabella 2, è risultato che il primo sovra-suolo è costituito da terreni principalmente granulari, ma con locali lenti a maggiore componente argillosa.

- Prove DPSH

Come visibile in Tabella 3, lo strato 1, che per quasi tutte le verticali d'indagine va dal piano campagna fino a circa un metro di profondità, presenta dei terreni completamente poco consistenti, tanto che l'asta di battuta, superati i primi 20 cm, è penetrata esclusivamente con il peso del maglio. Questo implica bassissime caratteri-

Tabella 2 - Risultati dell'analisi granulometrica.

CAMPIONE	UMIDITÀ	GHIAIA	SABBIA	LIMO	ARGILLA	GRANULOMETRIA
n.	%	%	%	%	%	
1	47,06	4,96	43,2	11,91	39,82	sabbia argillosa debolmente limosa
2	32,84	4,44	41,3	14,45	39,82	sabbia argillosa debolmente limosa
3	31,27	3,96	34,19	22,33	39,82	sabbia argillosa debolmente limosa
4	39,97	2,81	10,93	46,45	39,82	limo argilloso debolmente sabbioso
5	21,54	3,16	12,32	44,69	39,82	limo argilloso debolmente sabbioso
6	40,12	2,35	25,61	32,23	39,82	argilla limosa sabbiosa
7	26,46	17,19	18,32	24,66	39,82	argilla limosa debolmente sabbiosa ghiaiosa
8	31,27	26,31	46,65	18,47	7,52	sabbia ghiaiosa limosa
9	25,71	26,31	55,4	36,02	6,82	sabbia ghiaiosa limosa

Tabella 3 - Risultati delle prove penetrometriche DPSH.

NUMERO DELLO STRATO	UNITÀ LITO-STRATIGRAFICA	MEDIA COLPI	SPESORE (m)	CLASSIFICAZIONE AGI
1	Terreno vegetale	1	0,0-1,0	Poco consistente
2	Alterazione depositi tufacei	4,2	1,0-3,0	Poco consistente
3	Deposit tufacei incoerenti	5,7	3,0-5,0	Poco addensato
4	Deposit tufacei semi-litoidi	51	5,0-5,2	Molto addensato

stiche geotecniche per questo primo strato, situazione che si è ripetuta con spessori leggermente diversi su tutte le prove penetrometriche.

- Indagine Geo-radar

L'obiettivo dell'interpretazione dei radar-grammi è identificare le variazioni anomale nel primo strato del sottosuolo lungo le traiettorie registrate. Durante le nostre osservazioni, abbiamo notato che la distribuzione orizzontale e verticale delle radici rimane stabile fino a una profondità di circa un metro dal suolo. Questo suggerisce che la maggior parte delle ra-

dici si concentra in questo strato superiore del terreno. Per la nostra indagine, abbiamo utilizzato un valore medio della costante dielettrica dei materiali pari a 9 in relazione alla granulometria dell'area di studio, che ha comportato una velocità di propagazione degli impulsi radar di 0,10 m/ns. Utilizzando un'antenna da 900 MHz, siamo riusciti a esplorare fino a una profondità massima di 1,30 m dal piano di campagna, mentre con un'antenna da 400 MHz abbiamo raggiunto i 2,00 m di profondità.

Le planimetrie di interpolazione radar (*time slices*) mostrano chiaramente (Figura 2)

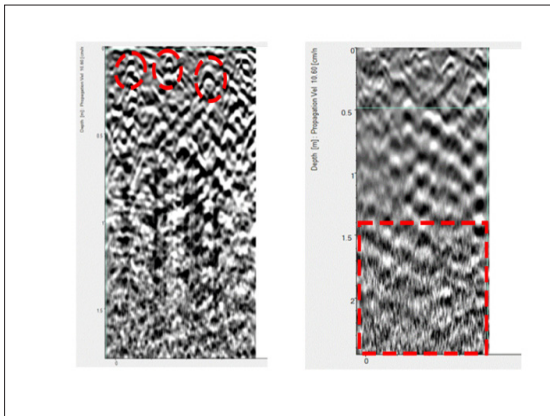


Figura 2 - A sinistra, la scansione Georadar con antenna 400 MHz: con i cerchietti in rosso sono indicati gli apparati radicali. A destra, la scansione con antenna 900 MHz: nel rettangolo rosso è evidenziato un aumento dell'umidità del suolo.

la distribuzione degli apparati radicali entro il primo metro di profondità, evidenziando la loro concentrazione in questo strato superficiale. Inoltre, mostrano l'aumento graduale dell'umidità a partire da circa 1,20 m di profondità, evidenziando come questi dati siano cruciali per comprendere le caratteristiche del terreno sotto esame.

4.2 Piovosità e ventosità nell'area di studio

I dati della stazione meteorologica di Vigna di Valle evidenziano che attorno al Lago di Bracciano la piovosità media annua nel ventennio considerato (2000-2019) è stata pari a $843,1 \pm 100,3$ mm ma nel decennio 2010-2019 è risultata del 24% maggiore rispetto al decennio precedente (932 contro 754 mm). Le precipitazioni medie sono elevate ma non particolarmente abbondanti, tuttavia, sono piuttosto concentrate. Il regime pluviometrico è in linea con i caratteri climatici dell'antiappennino vulcanico laziale, con massimo principale nella stagione autunnale, massimo secondario a inizio primavera e attenuata siccità estiva. Nel solo semestre che va da ottobre a marzo cade circa il 70% della

pioggia annua e il 44% nel trimestre ottobre-dicembre.

Ogni anno ci sono state in media 6,4 giornate in cui le raffiche di vento hanno superato i 75 km/h. Va sottolineato che metà dei 28 eventi meteorologici durante i quali le raffiche di vento hanno avuto velocità superiori a 90 km/h si sono verificati negli ultimi 5 anni considerati (2015-2019). Si tratta di 2,8 eventi all'anno in media. Nello stesso quinquennio si sono verificati i 12 eventi in cui il vento registrato ha superato i 120 km/h, inclusi tre in cui le raffiche di vento hanno superato 150 km/h. Le giornate in cui la velocità del vento supera i 75 km/h si verificano con maggiore frequenza nel periodo autunno-invernale in corrispondenza con i picchi di precipitazione (Figura 3). Tuttavia, eventi con ventosità molto elevata, superiore a 90 km/h, si sono verificati anche in piena estate.

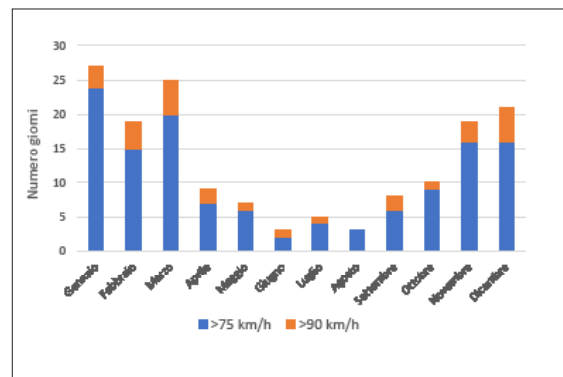


Figura 3 - Numero complessivo di giornate ventose mensili con velocità delle raffiche superiore a 75 km/h e 90 km/h (Stazione meteorologica di Vigna di Valle - Roma; periodo 2000-2019).

4.3 Caratterizzazione dendrometrica delle fasce boscate

Nelle Tabelle 4 e 5 sono riportati i principali attributi dendrometrici delle fasce di bosco indagate, che risultano essere alquanto variabili da punto a punto soprattutto in termini di densità di piante. Per quanto riguarda le dimen-

Tabella 4 - Densità di piante e composizione arborea delle fasce boscate, per il complesso delle aree di saggio e distinte per lato della strada.

	AREA DI SAGGIO	PIANTE TOTALI	PIANTE CON d > 22,5 cm	PIANTE CON d < 22,5 cm		PIANTE DI QUERCIA	
	n°	n ha ⁻¹	n ha ⁻¹	n ha ⁻¹	%	n ha ⁻¹	%
Tutte le AdS	1	500	267	233	46,7	244	91,7
	2	200	178	22	11,1	178	100,0
	3	756	211	544	72,1	189	89,5
	4	467	122	344	73,8	100	81,8
	5	644	122	522	81,0	78	63,6
	6	1133	100	1033	91,2	56	55,6
	7	1278	111	1167	91,3	100	90,0
	8	956	78	878	91,9	78	100,0
	Media	742	149	593	80,0	128	86
	Dev. St.	363	64	401		67	
	CV (%)	49,0	43,2	67,7		52,6	
AdS 1-3 Lato NO	Media	485	219	267	55,0	204	93
	Dev. St.	278	45	263		36	
	CV (%)	57	21	99		18	
AdS 4-8 Lato SE	Media	896	107	789	88,1	82	78
	Dev. St.	337	19	346		19	
	CV (%)	37,6	17,4	43,9		22,6	

sioni degli alberi, il popolamento si presenta più omogeneo sul Lato NO.

Sul lato SE la densità totale di piante è in media quasi doppia rispetto al Lato NO. Il rapporto si inverte se si considerano solo gli alberi con diametro superiore ai 22,5 cm, che sono solo il 12% del totale sul Lato SE contro il 45% sul Lato NO. Questa minore densità delle piante cavallettate sul Lato SE fa sì che il loro diametro medio sia sensibilmente più alto. Il rapporto inverso tra densità arborea e diametro medio porta a valori medi di area basimetrica poco diversi tra loro nei due lati. Fa eccezione l'Area di saggio 7 dove sono risultate del tutto assenti gli alberi di diametro superiore a 42 cm.

Il contingente di piante sottoposte a cavallettamento è costituito in prevalenza da querce

(86% in media considerando il totale delle aree di saggio). Sul Lato SE, la presenza di cerro e farnetto è inferiore alla media e consente una maggiore presenza di altre latifoglie, in particolare carpino bianco, acero campestre e robinia.

Le dimensioni diametriche medie degli alberi sono elevate su entrambi i lati della strada. In tutte le aree di saggio sono stati misurati soggetti con più di 80 cm di diametro e più di 35 m di altezza, tranne che nella n° 7.

La distribuzione delle frequenze diametriche costruita con i valori medi di classe rilevati nelle otto aree di saggio evidenzia un intervallo di valori molto ampio e la tendenziale diminuzione del numero di alberi al crescere del diametro; tuttavia, l'andamento è piuttosto irregolare con diversi picchi anche nelle classi più grandi (Figura 4). Le classi di diametro

Tabella 5 - Caratteristiche dendrometriche delle fasce boscate, per il complesso delle aree di saggio e distinte per lato della strada.

	AREA DI SAGGIO	AREA BASIMETRICA	DIAMETRO MEDIO	ALTEZZA MEDIA	COEFFICIENTE IPSODIAMETRICO	INCLINAZIONE DEL FUSTO
	n°	m ² ha ⁻¹	cm	m		gradi
Tutte le AdS	1	33,4	41,7	30,2	72,4	7,5
	2	33,0	48,6	31,6	64,9	10,6
	3	38,1	50,7	31,9	63,0	8,8
	4	33,6	65,4	34,2	52,2	3,3
	5	40,5	81,4	36,1	44,3	5,7
	6	32,7	86,5	36,6	42,3	9,0
	7	10,4	36,4	29,0	79,7	6,4
	8	36,4	77,2	35,6	46,1	2,1
	Media	32,3	61,0	33,1	58,1	6,7
	Dev. St.	9,3	19,2	2,9	13,9	2,9
CV	28,7	31,5	8,7	24,0	43,2	
AdS 1-3 Lato NO	Media	34,8	47,0	31,2	66,7	8,9
	Dev. St.	2,8	4,7	0,9	5,0	1,5
	CV	8,1	10,0	2,9	7,5	17,2
AdS 4-8 Lato SE	Media	30,7	69,4	34,3	52,9	5,3
	Dev. St.	11,8	20,0	3,1	15	2,7
	CV	38,3	28,9	9,0	29,1	50,5

superiori a 80 cm si collocano nelle zone 2 e 3, cioè quelle più interne rispetto alla strada, situate tra i 10 e i 30 metri dal ciglio stradale. Gli individui con diametri minori si trovano maggiormente entro i 10 metri dal margine stradale (zona 1) dove, tuttavia, si registra anche la presenza sporadica di esemplari di grosse dimensioni (60-84 cm di diametro).

La struttura verticale delle fasce boscate è pluristratificata su entrambi i lati della strada. Ciò è dimostrato dalla presenza in tutti i punti campionati di un denso contingente di piante di diametro inferiore ai 22,5 cm (Tabella 4), che costituisce lo strato inferiore del soprassuolo, e dall'ampio intervallo delle altezze misurate nelle aree di saggio per costruire le curve ipsometriche. Nel grafico di Figura 5 si

osserva anche l'accentuata variabilità dei valori di altezza degli alberi appartenenti alle classi diametriche tra 25 e 45 cm, su entrambi i lati della strada.

La fertilità stazionale è elevata, come dimostra la presenza di soggetti che superano i 40 m (Figura 5), e dal confronto con i valori di altezza dominante delle classi di età maggiori riportati sulla tavola alsometrica delle cerrete dei Monti Cimini (Paganucci, 1975) che si fermano a 25-26 m a 120 anni pur vegetando in condizioni ecologiche del tutto simili a quelle di Macchia Grande. La fertilità sembra essere migliore nella fascia SE dove l'altezza media delle piante è superiore e dove sono stati misurati i soggetti più alti. Questo fatto è da mettere in relazione con la conformazione a impluvio

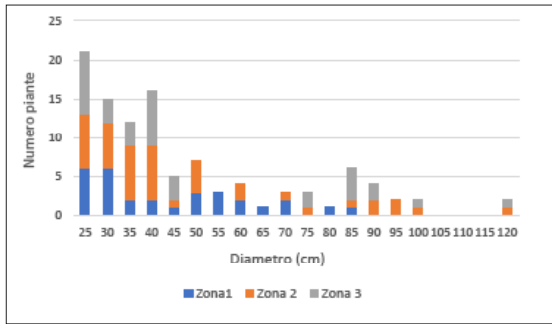


Figura 4 - Distribuzione media degli alberi in classi diametriche, suddivisa per zone di rilievo dendrometrico poste a distanza crescente rispetto al ciglio della strada.

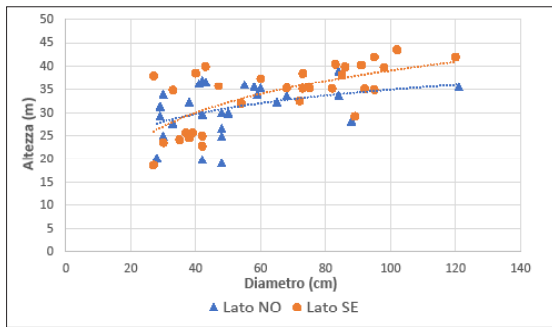


Figura 5 - Curve ipsometriche delle fasce boscate sui due lati della strada.

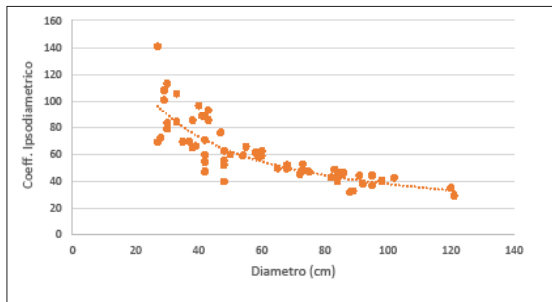


Figura 6 - Andamento del Coefficiente ipsodiametrico in funzione del diametro del fusto degli alberi delle fasce boscate.

che caratterizza il terreno lungo la fascia SE, che favorisce l'accumulo di suolo e acqua.

La stabilità meccanica di un albero, cioè la sua capacità di resistere alle forze che tendono a farlo schiantare, può essere sinteticamente valutata attraverso il Coefficiente Ipsodiametrico (CI). La soglia critica di questo parametro,

oltre la quale un albero viene definito ad alto rischio di essere abbattuto dal vento, è di solito posta in letteratura pari a 75-80 (La Marca, 2017; Wonn e O'Hara, 2001). Va ricordato che, come già accennato, altri fattori influiscono sulla caduta di un albero a causa del vento, per cui si tratta di una soglia solo indicativa. Il valore medio del CI del popolamento lungo le fasce esaminate non è particolarmente elevato (Tabella 5). Nella fascia NO è risultato più alto ma sempre al di sotto della soglia critica. Solo nell'area di saggio n° 7 questo valore viene raggiunto in quanto il popolamento è costituito solo da alberi di diametro compreso tra 25 e 40 cm. Infatti, osservando l'andamento del CI in funzione della classe diametrica si nota che il valore medio di CI diminuisce al crescere del diametro (Figura 6). I valori più alti si verificano, quindi, nelle classi tra 25 e 50 cm dove sono stati campionati diversi individui con CI uguale o superiore a 70.

Si tratta di 17 alberi, localizzati in maggior misura nelle aree di saggio sul Lato NO, dove è più alta la densità di piante con diametro sopra la soglia di cavallettamento (Tabella 4), e nelle parti più interne rispetto alla strada (Zone 2 e 3) dove sono concentrate le piante delle classi diametriche più grandi (Fig. 4). I soggetti in questione sono, quindi, cresciuti in condizioni di elevata competizione per la luce. Il loro diametro è compreso tra 28 e 47 cm ed hanno un'altezza che in media è superiore a 32 m e che in alcuni casi supera 38 m (Tabella 6). In base a questi parametri dendrometrici, è questa la categoria di alberi maggiormente a rischio di essere abbattuti dal vento e che, in virtù della loro altezza e della distanza dalla strada potrebbero, cadendo, invadere la carreggiata.

Va però notato che le dimensioni della loro chioma non sono sproporzionate rispetto al diametro del fusto e, dunque, appaiono in linea con quelle dei soggetti appartenenti alle altre classi diametriche almeno come valori

Tabella 6 - Localizzazione e dimensioni dei 17 alberi con Coefficiente ipsodiametrico pari o superiore a 70.

Area di saggio	Lato	Numero alberi			Totale	Diametro (cm)		Altezza (m)	
		Zona				min	max	min	max
		Esterna	Mediana	Interna					
1	NO	2		2	4	28	41	20,2	26,3
2	NO		3	1	4	30	42	24,9	37
3	NO			3	3	29	43	29,2	36,6
4	SE	1	1		2	33	47	34,8	35,7
5	SE			2	2	40	43	38,6	40
6	SE			1	1	27		38	
7	SE		1		1	30		23,6	
8	SE				0	-	-	-	-
Totale		3	5	9	17				

medi. L'altezza di inserzione sul fusto di questo sottocampione è pari in media a poco più della metà della loro altezza totale così come accade per tutti gli altri alberi di cui è stata misurata la chioma. Le chiome del sotto campione hanno un diametro che in media vale 8,1 m ma che aumenta linearmente al crescere della dimensione del fusto non diversamente da quanto succede considerando tutti gli alberi del campione (Figura 7). Le chiome più grandi, in grado di determinare un forte effetto vela sono, quindi, proprie dei soggetti con i massimi diametri che hanno anche le altezze più elevate e sono quindi più esposte al vento.

Il diametro della chioma delle piante con CI superiore a 70 è in media pari a 22,9 volte il diametro del fusto, mentre quello del totale delle piante misurate è di 21,6, valori che ricadono nell'intervallo proprio delle latifoglie che crescono in popolamenti forestali chiusi (Hemery *et al.*, 2005). Il valore del rapporto $D_{ch}/D_{1,30}$ tende a diminuire lentamente al crescere del diametro ed è più variabile nelle classi

diametriche 30-45 dove ci sono soggetti che hanno ampiezza delle chiome superiori a 30 volte il diametro del fusto e altri dove tale valore scende a 15.

Un ulteriore parametro che può andare a incidere sulla propensione al cedimento di un albero è l'inclinazione del fusto ma il campionamento effettuato non ha evidenziato situazioni particolarmente critiche (Tab. 5). Dei 59 alberi su cui è stata rilevata questa caratteristica, 35 sono risultati avere inclinazione del fusto superiore a 5°, sempre in direzione della

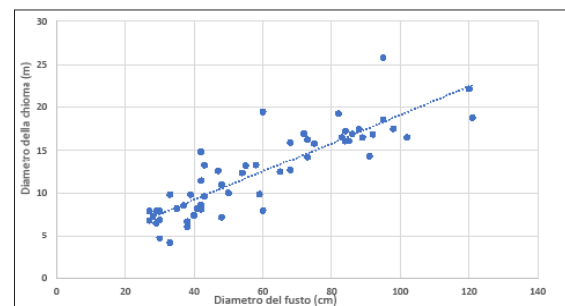


Figura 7 - Andamento del diametro delle chiome in funzione del diametro del fusto degli alberi delle fasce boscate.

strada. L'inclinazione media è di poco inferiore ai 7°, con valori massimi di 25° su 5 piante, tutte appartenenti alle aree di saggio a NO della strada (n° 1, 2 e 3). L'inclinazione del fusto degli alberi con CI superiore a 70 è, in media, di poco maggiore a quella stimata per l'intero popolamento.

5. DISCUSSIONE

Nella fascia di territorio a ovest del Lago di Bracciano, dove sono localizzate l'area di studio e la stazione meteo che ha fornito i dati per l'analisi climatica, non sono infrequenti le giornate durante le quali le raffiche di vento raggiungono velocità superiori ai 75 km/h, un'intensità che comincia a essere critica per la resistenza di un albero all'abbattimento anche se si trova in buone condizioni vegetative. La frequenza di questi eventi estremi appare in aumento negli ultimi anni in Europa, forse a causa del cambiamento climatico, e ciò potrebbe avere un impatto fortemente negativo sugli alberi delle zone urbane e periurbane (Portoghesi *et al.*, 2023). Va poi considerato che, nel caso di studio, l'apertura nel bosco determinata dalla costruzione della strada accresce la possibilità che il vento possa creare al suo interno vortici che incrementano la forza abbattente sulle chiome degli alberi.

L'azione del vento come fattore scatenante la caduta degli alberi può essere favorita da altri fattori che predispongono le piante alla stroncatura del fusto o al ribaltamento per cedimento dell'apparato radicale. In primo luogo, la presenza di alterazioni a carico del fusto e dell'apparato radicale determinati da funghi o insetti. Questo fattore, come evidenziato nel paragrafo 2.1, è stato tenuto sotto controllo dall'ente proprietario delle fasce boscate e gli alberi che presentavano questo tipo di criticità sono stati abbattuti a scopo preventivo.

Particolare attenzione in questo studio è stata data alle dimensioni e alla forma degli alberi e alle caratteristiche strutturali del popolamento forestale lungo le fasce, che possono facilitarne la caduta sotto la spinta del vento. Trattandosi di porzioni bosco con elevata densità di alberi e non di filari di piante, le valutazioni sul pericolo di caduta sono riferite all'intero popolamento o a categorie dimensionali di alberi al suo interno, e non a singoli soggetti, considerando le condizioni strutturali del popolamento in cui sono cresciuti.

Le fasce boscate considerate nell'indagine hanno una struttura composita con profilo verticale nel suo complesso pluristratificato che trova riscontro in precedenti studi sui querceti di Macchia Grande (Agrimi *et al.*, 1991) e che determina un'ampia variabilità delle dimensioni degli alberi, in particolare della loro altezza, dimensione della chioma e coefficiente ipsodiametrico, parametri che maggiormente influiscono sul pericolo di caduta in caso di tempeste di vento.

La componente arborea delle fasce che è stata analizzata più da vicino è quella che comprende i soggetti con diametro superiore a 22,5 cm fino a oltre 120 cm. In questo intervallo di classi diametriche si collocano gli individui che formano lo strato superiore con altezza compresa tra 30 e 40 m. Sono questi gli alberi più problematici dal punto di vista della stabilità perché le loro chiome sono più direttamente esposte alla forza del vento, specie quando sono localizzate nella Zona 1 delle fasce, ossia quella più vicina alla carreggiata stradale, tra le quali alcune hanno valore critico di coefficiente ipsodiametrico. Gli alberi con valore critico di CI hanno diametri compresi nelle classi tra 25 e 50 cm mentre quelli con maggiore diametro, fino a oltre un metro, hanno un rapporto tra altezza e diametro più equilibrato. Questi ultimi, tuttavia, per via dell'elevata altezza e delle dimensioni notevoli

li della chioma, sono particolarmente esposti alla forza del vento.

La resistenza di una pianta all'azione ribaltante del vento dipende anche dalla solidità dell'ancoraggio a terra che il suolo offre alle sue radici. Le indagini effettuate hanno evidenziato come il suolo forestale lungo le fasce arboree considerate è caratterizzato da elevata profondità ma da scarse caratteristiche geotecniche, soprattutto nel primo metro di profondità, cioè quello maggiormente esplorato dagli apparati radicali. Il basso grado di compattezza del suolo è accentuato dalla elevata imbibizione determinata dall'apporto di acqua piovana. Le precipitazioni nel territorio attorno al lago di Bracciano sono mediamente abbondanti nell'arco dell'anno e si concentrano per più di due terzi nella stagione autunno-invernale e all'inizio della primavera. In questo stesso periodo, l'assorbimento di acqua dovuto all'evapotraspirazione degli alberi appartenenti a specie a foglia caduca è a livelli minimi mentre la probabilità che si verifichino eventi ventosi di forte intensità è massima. Inoltre, la forte imbibizione del suolo al di sotto di un metro di profondità inibisce lo sviluppo in profondità dell'apparato radicale come evidenziato dall'indagine Geo-Radar a conferma delle osservazioni compiute sugli apparati radicali di alcuni alberi abbattuti dal vento (Felicetti, 2018). La scarsa compattezza del suolo che gli fornisce l'ancoraggio rende precaria la stabilità anche degli alberi di maggiori dimensioni diametriche, dotati di ampie chiome, che pure hanno rapporto altezza/diametro ben al di sotto della soglia critica.

6. CONCLUSIONI

Le indagini svolte hanno evidenziato che lungo le fasce di bosco esaminate il pericolo che gli alberi cadano a causa del vento è elevato

a causa delle loro dimensioni e della struttura del soprassuolo di cui fanno parte, e viene amplificato dalle caratteristiche geotecniche e geofisiche del substrato geopedologico e dall'elevata imbibizione del suolo durante la stagione autunno-invernale.

In definitiva, gli alberi che crescono nelle fasce boscate analizzate sono un po' come giganti dai piedi di argilla, il cui comportamento in caso di tempesta di vento non è individualmente prevedibile dipendendo dallo stato dei diversi fattori predisponenti al momento del verificarsi dell'evento.

Come è, allora, possibile ridurre il rischio che le piante nelle giornate di forte mal tempo possano cadere e determinare danni a persone e veicoli, vista l'alta intensità di traffico che interessa i tratti di strada che fiancheggiano le fasce boscate?

Alla luce di quanto emerso da questo studio sembrano possibili solo due linee di gestione delle fasce boscate:

1. Eliminazione del rischio con un orizzonte temporale pluridecennale. Questa soluzione comporterebbe l'abbattimento di tutti gli alberi con dimensione superiore a 22,5 cm su entrambi i lati della strada per una profondità di 30 m. Durante le operazioni di taglio andrebbe messa la massima attenzione nel preservare un contingente sufficientemente numeroso di individui con diametro inferiore a 22,5 cm che faciliterebbe l'evoluzione del popolamento verso un soprassuolo ancora dominato dalle specie quercine. Sarebbe, poi, necessaria un'attività selvicolturale mirata a favorire l'affermazione del cerro e del farnetto e il controllo delle specie attualmente accessorie soprattutto di quelle a carattere invasivo come la robinia. Si tratterebbe di una soluzione a forte impatto naturalistico e paesaggistico anche tenendo conto che le fasce arboree in questione costituiscono una por-

zione della ZSC IT6030008 “Macchia di Manziana”.

2. Gestione del rischio con un orizzonte di breve periodo. Questa scelta comporterebbe l'abbattimento dei soli alberi con CI pari o superiore a 70 avendo cura di non aprire spazi troppo ampi tra le chiome degli alberi rilasciati, all'interno dei quali il vento potrebbe creare turbini pericolosi per la stabilità delle piante rimaste in piedi. Verrebbero rispettati soprattutto gli alberi di grandi dimensioni che rimarrebbero però instabili a causa delle caratteristiche del suolo, specie nei periodi di forte piovosità e imbibizione del substrato. All'azione selvicolturale andrebbe affiancato il monitoraggio frequente delle condizioni fitosanitarie degli alberi. Questa soluzione non sarebbe da sola in grado di garantire la piena sicurezza di chi transita lungo la strada in presenza di forti venti ma imporrebbe un'attenta gestione del rischio residuo attraverso la regolamentazione dell'accesso ai tratti di strada interessati dalle fasce arboree. Si renderebbero necessari: i) un'opportuna segnalazione del livello di rischio presente nei tratti critici, anche in presenza di vento moderato (40-50 km/h); ii) l'implementazione di un sistema di allarme basato sulle previsioni meteorologiche a breve e brevissimo termine che consenta la tempestiva chiusura della strada nelle giornate in cui fosse particolarmente alta la probabilità di eventi ventosi di forte intensità, con raffiche di oltre 90 km/h. È chiaro che l'adozione di questa soluzione potrebbe risultare particolarmente onerosa per l'Università Agraria di Manziana, responsabile a termini di legge delle conseguenze della caduta degli alberi.

I dati raccolti dalla centralina meteorologica recentemente installata in prossimità delle fasce boscate consentiranno nel medio periodo

una migliore caratterizzazione del microclima locale soprattutto per quel che riguarda la frequenza e l'intensità delle tempeste di vento.

In ogni caso sarebbe opportuno, a partire dal prossimo Piano di Gestione e Assestamento Forestale, inserire le fasce boscate prospicienti i tratti di strada in questione, per una profondità minima di 30 metri, in una compresa forestale distinta dal resto di Macchia Grande di Manziana, nella quale operare un tipo di gestione in grado di garantire nel tempo la stabilità degli alberi, intervenendo preventivamente sui soggetti arborei maggiormente a rischio di caduta.

La caduta degli alberi che crescono lungo percorsi viari molto frequentati è un disservizio che riduce il valore ambientale e sociale delle aree verdi situate nei contesti urbanizzati. L'aumento dei fenomeni meteorologici estremi, tra cui le tempeste di vento, potrebbe far sensibilmente incrementare la probabilità che questi eventi si verificano. Solo un approccio multidisciplinare che dia la giusta considerazione a tutti i diversi fattori che possono determinare la caduta degli alberi può alla fine portare a scelte di gestione consapevoli che determinino l'effettiva riduzione del rischio di gravi incidenti.

BIBLIOGRAFIA

- Agrimi M., Ciancio O., Portoghesi L., Pozzoli R., 1991 - *I querceti di cerro e farnetto di Macchia Grande di Manziana: struttura, trattamento e gestione*. Cellulosa e Carta, 5: 25-49.
- Antonescu B., Schultz D.M., Holzer A., Groenemeijer P., 2017 - *Tornadoes in Europe: An underestimated threat*. Bull. Am. Meteorol. Soc., 98: 713-728; <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0171.1>
- ASTM, 1972 - *Test designation D422. Standard Method for Particle size Analysis of Soils*. ASTM Philadelphia, USA.
- Battisti C., Poeta G., Fanelli G., 2016 - *An Introduction to Disturbance Ecology*. Springer Cham, 178 p.; <https://doi.org/10.1007/978-3-319-32476-0>
- Blasi C., 1984 - *Two examples of the use of numerical classification and ordination methods in the analysis*

- of structure and chorology of vegetation types*. Studia Geobotanica, 4: 129-1:15.
- Bond A.J., Schuppener B., Scaroelli G., Orr T.L.L., 2013 - *Eurocode 7: Geotechnical Design. Worked examples*. Report EUR 26227 EN. Joint Research Centre.
- Bruschi A., Crippa, F., 2014 - *Prove geotecniche di laboratorio: Guida pratica per la soluzione delle problematiche interpretative e di previsione geotecnica*. Dario Flaccovio Editore.
- Canessa A., 2019 - *Il Ciclone "Adrian". Una delle peggiori tempeste che abbia mai colpito l'Italia*. Rivista di Meteorologia Aeronautica, 3: 5-21.
- Cavicchia L., Von Storch H., Gualdi S., 2014 - *Mediterranean tropical-like cyclones in present and future climate*. J. Clim., 27: 7493-7501; <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-14-00339.1>
- CNR-UNI 10006, 1963 - *Costruzione e manutenzione delle strade. Tecnica di impiego delle terre*.
- Cullen S., 2002 - *Trees and Wind: Wind Scales and Speeds*. Arboric. Urban For., 28: 237-242; <https://doi.org/10.48044/jauf.2002.036>.
- De Rita D., Di Filippo M., Rosa C., 1996 - *Structural evolution of the Bracciano volcano-tectonic depression, Sabatini Volcanic District, Italy*. Geological Society, London, Special Publications, 110 (1): 225-236; <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1996.110.01.17>
- Faize A., Alsharahi G., 2020 - *Preliminary study of roots by georadar system*. In Embedded Systems and Artificial Intelligence: Proceedings of ESAI 2019, Fez, Morocco. Springer Singapore, p. 173-182.; https://doi.org/10.1007/978-981-15-0947-6_17
- Felicetti M., 2018 - *Analisi visiva speditiva su alberature ubicate nelle fasce boscate ai lati di Via Lazio e Via Braccianese-Claudia. Relazione tecnica*. Università Agraria di Manziana, Comune di Manziana, Città Metropolitana di Roma.
- Groenemeijer P., Púciik T., Holzer A.M., Antonescu B., Riemann-Campe K., Schultz D.M. et al., 2017 - *Severe convective storms in Europe: Ten years of research and education at the European Severe Storms Laboratory*. Bull. Am. Meteorol. Soc., 98: 26412651; <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-16-0067.1>
- Gruppo di lavoro "Sicuramente alberi", 2011 - *Procedure per la gestione del rischio da caduta alberi nelle aree Verdi estensive*.
- Hemery G.E., Savill P.S., Pryor S.N., 2005 - *Applications of the crown diameter-stem diameter relationship for different species of broadleaved trees*. For. Eco. Man., 215: 285-294; <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.05.016>
- Johnson E.A., Miyanishi K., 2021 - *Disturbance and succession*. In Plant Disturbance Ecology: The Process and the Response. Academic Press, p. 1-15; <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818813-2.00001-0>.
- La Marca O., 2017 - *Elementi di Dendrometria*. Pàtron Editore, 530 p.
- Linhares C.S.F., Gonçaves R., Martins L.M., Knapic S., 2021 - *Structural stability of urban trees using visual and instrumental techniques: A review*. Forests, 12; <https://doi.org/10.3390/f12121752>.
- Lunne T., Powell J.J., Robertson, P.K., 2002 - *Cone penetration testing in geotechnical practice*. CRC Press.; <https://doi.org/10.1201/9781482295047>
- Moderni P., Perrone E., Zezi P., 1968 - *Carta Geologica d'Italia, scala 1: 100.000, Foglio n. 143 Bracciano*.
- Paganucci L., 1975 - *Ricerche dendrometriche e alsometriche sulle cerrete dei Monti Cimini (Viterbo)*. L'Italia Forestale e Montana, 30 (1): 1-17.
- Pipinato A., 2018 - *Recent northeast italian tornado events: Lesson learned for improving structures*. Nat. Hazards; <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3380-2>.
- Pokorny J.D., 1992 - *Urban Tree Risk Management: A Community Guide to Program Design and Implementation*. USDA For. Serv. Northeast. Area St, Paul, MN, 1-106.
- Portoghesi L., Masini E., Tomao A., Agrimi M., 2023 - *Could climate change and urban growth make Europeans regard urban trees as an additional source of danger?* Frontiers in Forests and Global Change, 6; <https://doi.org/doi 10.3389/ffgc.2023.1155016>
- Roman L., Tenley M., Eusenman T., Koeser A., Ordóñez Barona C., Locke D., Jenneret D., Östberg J., Vogt J., 2020 - *Beyond "trees are good": Disservices, management costs, and tradeoffs in urban forestry*. Ambio, 50: 615-630; <https://doi.org/10.1007/s13280-020-01396-8>
- Sani L., 2017 - *Statica delle strutture arboree per la valutazione della stabilità*. Gifor, 943 p.
- Shackleton C.M., Ruwanza S., Sinasson Sanni G.K., Bennet S., De Lacy P., Modipa R., Mtati N., Sachikonye M., Thondhlana G., - 2016 - *Unpacking Pandora's Box: Understanding and Categorising Ecosystem Disservices for Environmental Management and Human Wellbeing*. Ecosystems, 19: 587-600; <https://doi.org/10.1007/s10021-015-9952-z>

- Spinoni J., Formetta G., Mentaschi L., Forzieri G., Feyen L., 2020 - *Global warming and windstorm impact in the EU*; <https://doi.org/10.2760/039014>
- Stokes A., Fourcaud T., Hruska J., Cermak J., Nadyezhdina N., Nadyezhdin V., Praus L., 2002 - *An evaluation of different methods to investigate root system architecture of urban trees in situ: I. Ground-penetrating radar*. *Journal of Arboriculture*, 28 (1): 2-10; <https://doi.org/10.48044/jauf.2002.001>
- Virost E., Ponomarenko A., Dehandschoewercker È., Quéré D., Clanet C., 2016 - *Critical wind speed at which trees break*. *Physical Review*, E 93 (2); <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.93.023001>
- Wonn H.T., O'Hara K.L., 2001 - *Height: Diameter ratios and Stability Relationships for four Northern Rocky Mountains Tree Species*. *Western Journal of Applied Forestry*, 16 (2): 87-94; <https://doi.org/10.1093/wjaf/16.2.87>